

**Vysoká škola báňská – Technická
univerzita Ostrava**

Fakulta strojní

Katedra energetiky

**Návrh úprav zařízení pro měření teploty ve
spalinovém traktu fluidního kotle**

**Propose Modification to the Equipment for Measuring
Temperature in the Fluidized Bed Boiler Flue Tract**

Student:

Bc. Branny Jan

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Bohumír Čech

Ostrava 2012

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Branny**

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení

Téma: **Návrh úprav zařízení pro měření teploty ve spalinovém traktu fluidního kotle**
Propose Modifications to the Equipment for Measuring Temperature in the Fluidized Bed Boiler Flue Tract

Zásady pro vypracování:

Vypracujte návrh úprav teploměru pro měření v abrazivním prostředí spalínového traktu fluidního kotle. Diplomová práce bude obsahovat:

1. Režerši zařízení pro měření teploty ve fluidní vrstvě.
2. Návrh zařízení pro měření teploty ve spalinovém traktu.
3. Odzkoušení a zhodnocení dosažených výsledků.

Grafické práce:

1. Výkresová dokumentace fluidního kotle.
2. Výkresová dokumentace úpravy teploměru.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČERNÝ, V. a kol.. *Parní kotle a spalovací zařízení*. SNTL Praha, 1975.
- [2] KOLAT, P. *Přenos tepla a hmoty*. Skripta VŠB - TU Ostrava, 1987.
- [3] ON 074017 *Tepelný výpočet parních kotlů*.
- [4] DLOUHÝ, T. *Výpočty kotlů a spalínových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2005.

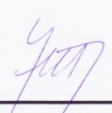
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Dr. Ing. Bohumír Čech**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012




prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2012

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst.3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavře licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohou jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21. 5. 2012

.....

Bc. Branny Jan

Český Těšín – Mosty, Na dolinách 185, 735 62

1. Anotace diplomové práce

Branny, J. Návrh úprav zařízení pro měření teploty ve spalinovém traktu fluidního kotle. Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB – Technická universita Ostrava.

Diplomová práce, vedoucí: doc. Dr. Ing Čech, Bohumír.

Diplomová práce se zabývá návrhem úprav zařízení pro měření teplot ve spalinovém traktu fluidního kotle. Zkoumá vliv fluidního lože v jednotlivých vrstvách na opotřebení jímek tepelných čidel. V kapitolách jsou popsány způsoby měření teplot a typy používaných měřidel. Na základě zjištěných výsledků je navržen teploměr z větší odolnosti vůči abrazi fluidních částic při zachování tepelné konstanty.

2. Anotation of thesis work

Branny, J. Propose Modification to the Equipment for Measuring Temperature in the Fluidized Bed Boiler Flue Tract. Ostrava: teacher's desk energetics, faculty mechanical VSB – technical college Ostrava.

Thesis work, leadership: doc. Dr. Ing Čech, Bohumír, to.

This thesis describes the design modifications for measuring temperatures in the fluidized bed boiler flue tract. Examines the impact of the fluidized bed in the individual layers on the heat sinks wear sensors. The chapters are described methods of measuring temperature and type of gauge. Based on the results of the thermometer is designed for the most abrasion resistance while maintaining a fluid particle thermal constants.

| | |
|---|----|
| 1. Měření teploty | 10 |
| 1.1 Princip měření | 10 |
| 1.2 Časová konstanta teploměrů | 11 |
| 2. Termočlánky | 12 |
| 2.1 Princip termočlánku | 12 |
| 2.1.1 Konstrukční řešení termočlánků | 14 |
| 2.1.2 Komerční typy termočlánků : | 14 |
| 2.1.3 Materiály a jejich vlastnosti | 16 |
| 3. Měření teploty v ohništích fluidních kotlů | 19 |
| 3.1 Měření teploty provozními teploměry | 19 |
| 3.1.1 Srovnání měření teplot na vstupu do cyklónu provozním teploměrem a s výzkumným měřením teploty | 24 |
| 4. Popis kotle K11 | 25 |
| 4.1 Parní kotel | 25 |
| 4.2 Spalovací zařízení | 27 |
| 5. Účinnost kotle | 29 |
| 5.1 Účinnost spalovacích zařízení | 29 |
| 5.2 Metoda přímá | 29 |
| 5.3 Metoda nepřímá | 29 |
| 5.3.1 Základní rozdělení kotlových ztrát | 30 |
| 6. Výpočet účinnosti K11 při spalování černého uhlí | 31 |
| 6.1 Vymezení hranic systému | 31 |
| 6.2 Rozbor paliva | 32 |
| 6.2.1 Převod hrubého rozboru paliva na prvkový (podle J.Snížka) | 32 |
| 6.3 Stechiometrické objemy spalovacího vzduchu a spalin | 35 |
| 6.4 Parametry spalin při dokonalém spalování | 36 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.5 | Střední měrná tepelná kapacita spalín..... | 40 |
| 6.6 | Určení účinnosti nepřímou metodou..... | 43 |
| 6.6.1 | Výpočet poměrných tepelných ztrát | 43 |
| 6.7 | Vliv odsiřování spalín na hmotnostní a tepelnou bilanci | 45 |
| 6.7.1 | Odsiřování spalín | 45 |
| 6.8 | Výpočet objemu vzduchu a spalín při odsiřování | 47 |
| 6.9 | Energetická bilance | 47 |
| 6.10 | Přepočet účinnosti při odsiřování..... | 48 |
| 7. | Výpočet rychlosti proudění spalín..... | 50 |
| 7.1 | Výpočet rychlosti proudění | 51 |
| 7.1.1 | Rychlost ve spodní části spalovací komory (výška 7,5 m):..... | 51 |
| 7.1.2 | Rychlost ve střední části spalovací komory (výška 15 m): | 51 |
| 7.1.3 | Rychlost ve spodní části spalovací komory (výška 27,5 m):..... | 52 |
| 7.1.4 | Rychlost za cyklony (výška 35 m):..... | 52 |
| 8. | Nestacionární vedení tepla. | 54 |
| 8.1 | Některé metody řešení úloh nestacionárního vedení tepla..... | 55 |
| 8.2 | Nestacionární vedení tepla a teorie podobnosti (2)..... | 55 |
| 9. | Závěr..... | 56 |
| 10. | Seznam literatury:..... | 57 |
| 11. | Přílohy: | 58 |

Seznam označení

tab 1 Použité veličiny a jednotky

| značka | veličina | rozměr |
|--|---|--------------------------------------|
| u | Měrná vnitřní energie | J.kg |
| A | Obsah popela | kg.kg ⁻¹ |
| A1-A10 A;A ₀ ;A _α | Konstanty rovnice pro výpočet $\overline{c_s}$ | |
| a ₁ | Podíl uhlíku paliva spáleného na CO ₂ | kg.kg ⁻¹ |
| B1-B10 B;B ₀ ;B _α | Konstanty rovnice pro výpočet $\overline{c_s}$ | |
| b | Podíl nespáleného uhlíku paliva | kg.kg ⁻¹ |
| C | Obsah uhlíku | kg.kg ⁻¹ |
| C1-C10 C;C ₀ ;C _α | Konstanty rovnice pro výpočet $\overline{c_s}$ | |
| $\overline{c_s}$ | Střední měrná tepelná kapacita spalin (při stálém tlaku) | kJ.m ⁻³ .K ⁻¹ |
| $\overline{c_{si}}$ | Střední měrná tepelná kapacita tuhých zbytků | kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| H | Obsah vodíku | kg.kg ⁻¹ |
| h | Entalpie | kJ.kg ⁻¹ |
| \dot{m} | Hmotnostní průtok | kg.s ⁻¹ |
| N | Obsah dusíku | kg.kg ⁻¹ |
| n _{Ca} | Součinitel přebytku vápníku | |
| n _s | Stupeň odsíření | |
| O | Obsah kyslíku | kg.kg ⁻¹ |
| p | Tlak | Pa; MPa |
| \dot{Q} | Tepelný tok | kJ.s ⁻¹ ; MW |
| Q ₁ | Tepelný tok vztažený na hmotnostní průtok paliva | kJ.kg ⁻¹ |
| Q _i ^r | Výhřevnost | kJ.kg ⁻¹ |
| R1-R10 | Pomocné konstanty stechiometrických objemů | |
| S | Obsah síry | kg.kg ⁻¹ |
| t | Teplota | °C |
| V | Objem vzduchu nebo spalin vztažený na 1kg nebo 1m ³ paliva | m ³ .kg ⁻¹ |
| V1-V4 | Pomocné hodnoty objemů spalin | m ³ .kg ⁻¹ |
| W | Obsah vody | kg.kg ⁻¹ |
| X | Hmotnostní podíl složky tuhých zbytků | kg.kg ⁻¹ |
| α | Součinitel přebytku vzduchu | |
| ζ | Relativní tepelná ztráta | 1 , % |
| η | Účinnost | 1 , % |
| v | Objem vlhkého vzduchu obsahující 1m ³ vzduchu suchého | |

| | | |
|-----------|--------------------------------------|----------------------------------|
| φ | Relativní vlhkost | |
| ω | Objemový podíl složky ve směsi plynů | $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ |

tab 2 Význam použitých indexů

| | | | |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------|
| C | uhlík | N ₂ | dusík |
| Ca | vápník | nv | napájecí voda |
| CaO | oxid vápenatý | O ₂ | kyslík |
| CaSO ₄ | | od | odluh |
| CO | oxid uhelnatý; hořlavina ve spalínách | pal | palivo; přivedeno palivem |
| CO ₂ | oxid uhličitý | pp | přehřátá pára |
| ČU | černé uhlí | s | spaliny |
| f | fyzický | SM | směs |
| H ₂ | vodík | SO ₂ | oxid siřičitý |
| H ₂ O | voda; vodní pára | ss | spaliny suché |
| HU | hnědé uhlí | sv | sdílení tepla do okolí |
| i | člen souboru | t | celkový (totální) |
| j | jmenovitá hodnota | ÚP | úletový popel |
| k | koncový; komín | v | vzduch |
| K | přepočet na odsíření | vs | vzduch suchý |
| LP | ložový popel | vyr | vyrobený (výkon) |
| min | minimální (teoretický) | 0 | počáteční, vztažný |

tab 3 Význam použitých exponentů

| | | | |
|---|--------------------------|-----|------------------|
| r | surové; spalované palivo | daf | hořlavina paliva |
| d | bezvodý vzorek (sušina) | o | organická hmota |

tab 4 Význam použitých zkratk

| | | | |
|---------|---------------------------|---------|---------------------------|
| ČU | černé uhlí | PR | přehřívák páry |
| D | drtič | PV | primární ventilátor |
| DMYCH | dmychadla | Sek.V | sekundární ventilátor |
| EKO | ohřívák vody (ekonomizér) | SOV | spalinový ohřívák vzduchu |
| EO | elektrostatický odlučovač | SV | spalinový ventilátor |
| HU | hnědé uhlí | TŽ a.s. | Třinecké železářny a.s. |
| ET a.s. | Energetika Třinec a.s. | ÚP | úletový popel |
| LP | ložový popel | VÝP | výparník |
| PK | parní kotel | | |

1. Měření teploty

1.1 Princip měření

Teplota je stavová, vnitřní, intenzivní termodynamickou veličinou, která úzce souvisí s teplem. K rozlišení pojmů „teplota“ a „teplo“ došlo teprve v první polovině 18. století. Přivádíme-li látce teplo, zvyšujeme vnitřní energii této látky jako stavovou veličinu. Vztah mezi vnitřní energií a teplotou je dán pomocí konstanty úměrnosti, kterou nazýváme měrnou tepelnou kapacitou. U vzdušiny se jedná o měrnou tepelnou kapacitu za stálého objemu:

$$du = c_v \cdot dT \quad (1)$$

Podstatu této závislosti vysvětluje molekulová teorie plynů. Po objevu, že teplo je energie, následovalo i vyjádření vztahu mezi teplem a kinetickou energií molekul. Kinetickou energii molekul můžeme vyjádřit pomocí Boltzmanovy konstanty k :

$$E_k = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T = \frac{m \cdot w_s^2}{2} \quad (2)$$

Čím vyšší je rychlost molekul, tím vyšší je teplota plynu. Vztah pro střední kvadratickou rychlost molekul:

$$w_s = \sqrt{\frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} = \sqrt{\frac{3 \cdot R_m \cdot T}{N_m \cdot m}} \quad (3)$$

Protože tlak odpovídá počtu nárazů molekul na stěny, je možno vyjádřit závislost tlaku na hustotě plynu a rychlosti molekul:

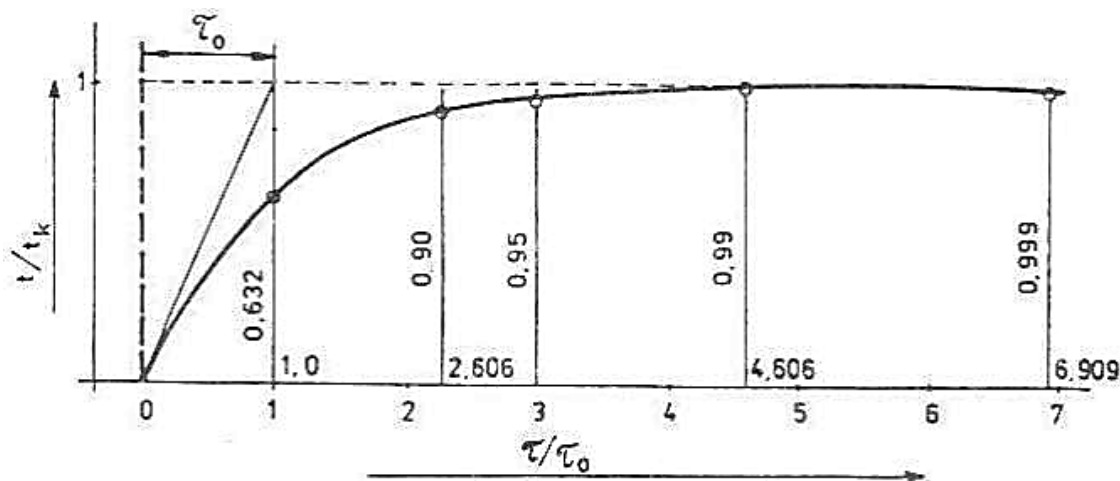
$$p = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot w^2 \quad (4)$$

Vnitřní energie je dána tedy neuspořádaným pohybem atomů a molekul. Zvyšováním vnitřní energie dochází k nárůstu rychlosti pohybu atomů a molekul v soustavě. Ke zvyšování rychlosti atomů a molekul dochází, ať se jedná o látku plynnou, kapalnou nebo pevnou. V případě látek plynných bereme v úvahu navíc skutečnost, že pokud přivádíme teplo vzdušině, která se nachází v uzavřené nádobě, dochází u ní zároveň k nárůstu tlakové složky. Vnitřní energie má tedy obecně složku kinetickou a tlakovou:

$$du = du_k + du_p \quad (5)$$

1.2 Časová konstanta teploměrů

Časová konstanta teploměrů je čas, za který dosáhne údaj teploměru 63.2 % konečné hodnoty, když se skokem změní teplota prostředí, ve kterém je teploměr umístěn. Je měřítkem setrvačnosti teploměrného systému. Stanovujeme ji tak, že snímač teploměru, který ukazuje teplotu okolí, ponoříme do teplé lázně a zaznamenáváme změnu teploty v závislosti na čase.



Obr. 1 Přechodová charakteristika teploměru

Pokud potřebujeme znát teplotu prostředí mnohem rychleji, než je teploměr ustálen na konečné hodnotě, můžeme vypočítat skutečnou měřenou teplotu po uplynutí této časové konstanty ze vztahu:

$$t = t_0 + \frac{\Delta t_{\tau_0}}{0,632} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (6)$$

Kde: Δt_{τ_0} je teplotní rozdíl mezi hodnotou teploměru, kterou ukazuje teploměr po uplynutí časové konstanty a mezi počáteční teplotou. Předpokladem správného použití tohoto vztahu je, že teploměr reaguje na změnu prostředí okamžitě. Většinou se však snažíme použít teploměr s nízkou časovou konstantou (co nejnížší hmotností).

| Teploměr | Časová konstanta (s) | | |
|---|----------------------|-----------------|----------------|
| | Voda | Proudící vzduch | Vzduch v klidu |
| Termočlánek bez ochranného pouzdra | 2 | 11 | 166 |
| Termočlánek s ocelovým pouzdrem | 22 | 400 | 840 |
| Odporový teploměr bez pouzdra | 21 | 70 | 430 |
| Odporový teploměr s ocelovým pouzdrem | 151 | 455 | 1 560 |
| Snímač teploty s termoelektrickým článkem „K“ | 150 | 460 | 890 |

Tab. 1 Informativní přehled časových konstant nejběžnějších teploměrů

2. Termočlánky

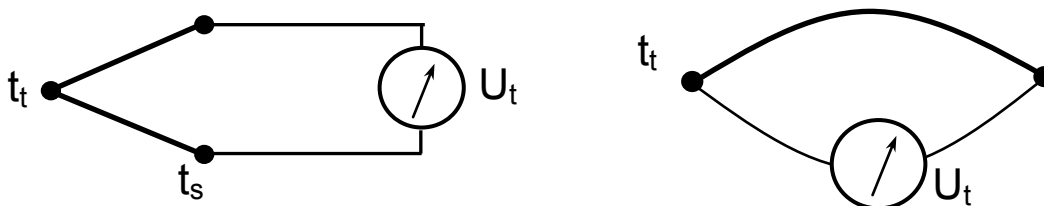
2.1 Princip termočlánku

Snímače neboli termočlánky jsou přístroje, které pro měření teploty využívají tzv. termoelektrického jevu, který můžeme vysvětlit takto:

Zahřejeme-li jeden spoj uzavřeného okruhu složeného ze dvou různých kovů, převládá potenciální rozdíl v jednom spoji nad rozdílem v druhém spoji a v okruhu působí určité napětí, které nazýváme termoelektrické, které dává vznik termoelektrickému proudu.

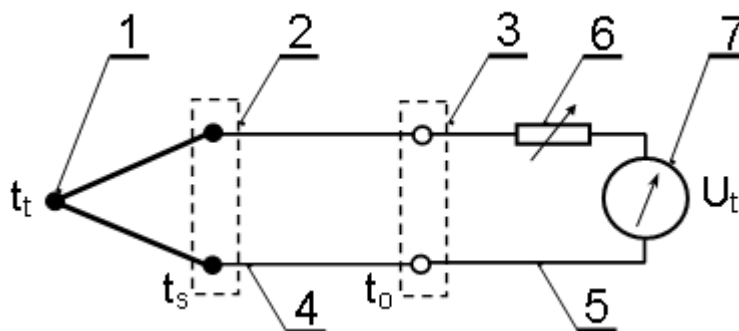
Peltier objevil r. 1834, že prochází-li elektrický proud spojením dvou kovů, dochází k ohřevu nebo ochlazování jejich spoje.

Při přesném měření termoelektrického jevu bylo Thomsonem zjištěno, že elektromotorická síla vzniká i v jediném stejnorodém vodiči, má-li některá jeho část jinou teplotu než část zbývající. Prochází-li potom takovýmto nestejně zahřátým vodičem elektrický proud, vzniká v tomto vodiči kromě Jouleova tepla (které je dáno odporem) i další teplo. Naproti tomu v části vodiče, v němž je směr elektrického proudu opačný, je vznikající Jouleovo teplo o určitou část sníženo. Směr a velikost vzniklé elektromotorické síly závisí na složení vodiče. Pro vznik Thomsonovy elektromotorické síly je nutný teplotní spád. Tomuto jevu říkáme Thomsonův efekt.



Obr. 2 Možnosti zapojení termočlánku

Hlavní část termočlánku (která je umístěna v měřeném prostředí) představuje spoj dvou kovových vodičů, tzv. měřící spoj (teplý konec). Druhé konce vodičů tvoří tzv. studený konec, ke kterému jsou připojeny vodiče s citlivým galvanometrem nebo milivoltmetrem (Obr. 3). Přívodní vodiče jsou často měděné a v místě studeného spoje vzniká proto Peltierova elektromotorická síla, s kterou je nutno při kalibraci



Obr. 3 Schéma zapojení termočlánku s kompenzací teplý konec

- 1 - termočlánku (měřící spoj), 2 - svorkovnice pro studené konce,
- 3 - porovnávací spoje, 4 - kompenzační vedení, 5 - spojovací vedení,
- 6 - justační odpor, 7 - měřící přístroj

termočlánku počítat. V případě, že by teplota jednoho ze spojů kolísala, měnila by se také vznikající elektromotorická síla a tím celková chyba měření. S další chybou, s kterou je nutno počítat, je Thomsonova elektromotorická síla, která bude tím větší, čím bude větší teplotní spád teplého a studeného konce.

Naopak nezáleží na teplotě, které je vystaven vlastní termočlánekový drát. Kdybychom totiž teplý konec umístili do prostředí s teplotou 800 °C, studený konec by se nacházel v prostředí s teplotou 20 °C a vlastní drát termočlánku by byl vystaven prostředí o teplotě 1000 °C, docházelo by samozřejmě ke vzniku Thomsonova efektu. Ten bude vznikat jednak mezi teplým koncem (700 °C) a teplotou 1000 °C pro teplotní spád 300 °C. V druhé části mezi teplotou 1000 °C a 20 °C pro teplotní spád 980 °C. Tytéž elektromotorické síly budou ovšem vznikat i v druhém drátu termočlánku, ale s opačným znaménkem. Proto se tyto síly vzájemně vyrovnají. Protože je nutno tyto chyby eliminovat na minimum, je nutno udržovat studený konec v konstantní teplotě, při které byl přístroj kalibrován nebo vliv teploty kompenzovat elektrickým obvodem.

Mezi studený konec termočlánku a měřící přístroj se často vkládá kompenzační vedení (Obr. 3), které je vyrobeno ze stejného materiálu jako vlastní materiál termočlánku nebo v případě dražšího materiálu se použije vodič, který má podobné

termoelektrické vlastnosti. Tím dosáhneme toho, že studený konec přesuneme do míst o stálé teplotě.

Kompenzaci teploty provádíme kompenzační skříňkou, jejíž hlavní částí je odporový můstek se třemi odpory, které na teplotě nezávisí a jedním odporem závislým na teplotě. Při teplotě okolí 20 °C je můstek vyvážený. Při změně teploty okolí dochází také ke změně odporu R_{20} a v můstku vznikne napětí, které odpovídá změně teploty.

Jiná možnost kompenzace teploty je umístit porovnávací spoj do termostatu, kde je konstantní teplota. Tu docílíme vyhříváním nádoby na konstantní teplotu.

Nejpřesnějších výsledků bychom docílili, pokud bychom umístili porovnávací konec do termosky s ledem. V praxi ale tento způsob nevyužíváme, neboť bychom museli hlídat a doplňovat množství ledu v termosce.

Vlastní elektromotorické napětí měříme výhylkovou metodou :

$$e = U_t \cdot \frac{R}{R + r} \text{ [mV]} \quad (7)$$

kde :

U_t – termoelektrické napětí [mV]

r – odpor termočlánku, kompenzačního vedení a spojovacího vedení [Ω]

R – vnitřní odpor měřicího přístroje [Ω]

V praxi jsou již měřicí přístroje vybaveny stupnicí přímo ve °C.

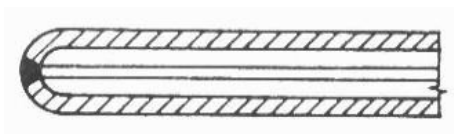
Jinou možností je měření kompenzační metodou, při které je možno dosáhnout větší přesnosti. Při této metodě se porovnává termoelektrické napětí se známým měnitelným napětím pomocí nulového indikátoru.

2.1.1 Konstrukční řešení termočlánků

Spoje termočlánku jsou zhotoveny svařováním nebo pájením natvrdo. Mají-li dráty větší průměr, je nutno je před svařením zkroutit dohromady, aby měly větší mechanickou pevnost. Jednotlivé dráty musí být vzájemně izolovány. Velmi často se pro vyšší teploty provádí izolace pomocí keramických korálků, které jsou navlečeny na jednotlivé dráty termočlánku.

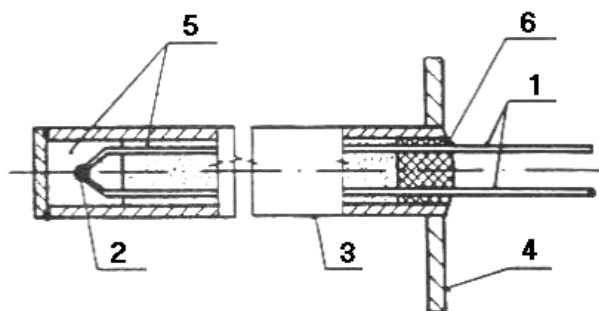
2.1.2 Komerční typy termočlánků :

Tyčový termočlánek – u kterého těleso termočlánu, které je izolováno keramickou kapilárou, je vsunuto do vzduchotěsné keramické trubičky.



Obr. 5 Měřicí konec trubkového termočlánu (uzemněné provedení)

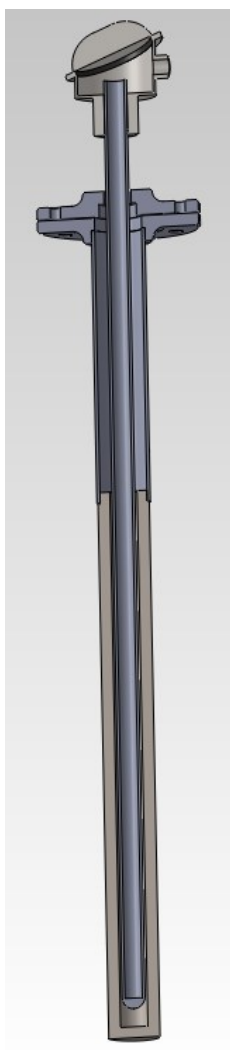
Celé těleso je chráněno kovovým pouzdrem.



Obr. 4 Plášťový termočlánek

Trubkový termočlánek – se skládá z kovové trubičky, která tvoří část termočlánu. Druhý kovový vodič je ve formě drátku vsunut do trubičky a zavařen (Obr. 5).

Plášťový termočlánek – kde v kovové trubičce je umístěn termočlánek (Obr. 6).



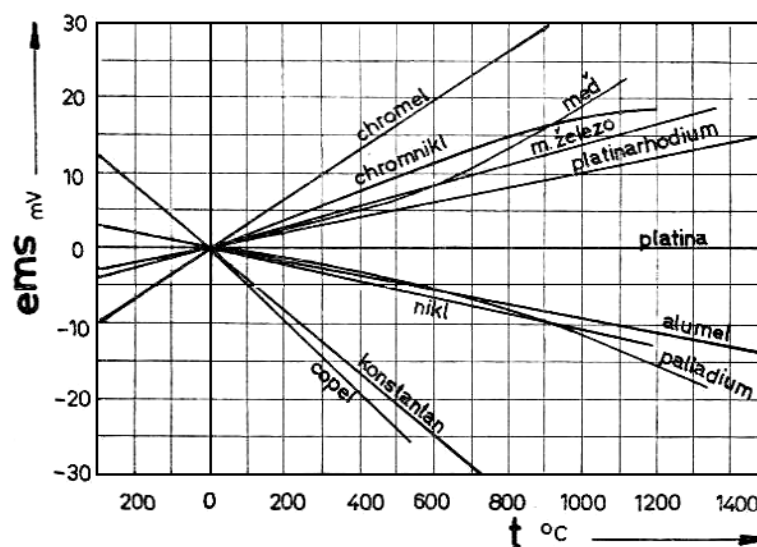
Obr. 6 Provedení teploměru s plášťovým termočlánekem

Plášťovina se vyrábí z oceli nebo Inconelu® a je naplněna izolačním materiálem (např. práškový kysličník hořečnatý MgO). Těleso je na konci zalito těsnicí látkou, z které vystupují koncovky termočlánku. Průměry plášťových termočlánků bývají 0,2 ÷ 6 mm.

2.1.3 Materiály a jejich vlastnosti

Jaké požadavky klademe na materiál termočlánků :

- Lineární závislost mezi vzniklou elektromotorickou silou a teplotním rozdílem mezi teplým a studeným koncem.
- Odolnost termočlánku proti teplotě, korozi a chemickým vlivům. Zvláště pokud měříme v agresivním prostředí.
- Vznik dostatečně velké elektromotorické síly. Vznikající elektromotorické síly jsou totiž malé a přístroje které je měří musí být velmi citlivé.
- Stálost nakalibrovaného termočlánku. I tak je nutno každého půl roku nechávat termočlánky překalibrovat.



Obr. 7 Velikost vzniklé elektromotorické síly v závislosti na teplotě u některých termočlánekových kovů

Na Obr. 2.18 je znázorněn průběh elektromotorických sil v závislosti na teplotě. Porovnáváme podle platiny, která rozděluje materiály na ty, které mají pozitivní elektromotorickou sílu (křivky mají rostoucí trend) a ty, které mají negativní elektromotorickou sílu (klesající křivky).

Termočlánky dělíme podle kovů, z kterých jsou vyrobeny a značení odpovídá chemickým značkám těchto kovů. V současné době je řada termočlánků vyrobena ze slitin, které lépe splňují požadavky kladené na materiál termočlánků. Složení těchto slitin většinou výrobci neuvádějí.

Termočlánek měď-konstantan. Kladným elementem je čistá měď, záporným konstantan. Konstantan je slitina, která je u termočlánků velmi často používána, neboť vykazuje poměrně vysokou elektromotorickou sílu (skládá se z 58 % mědi a 42 % niklu).

Termočlánek železo-konstantan. Kladným elementem je drát z čistého železa, záporným elementem je konstantan. Tento typ článku je často používán. Při vyšších teplotách se používá ochranné pouzdro vyrobené z železa, které tvoří část termočlánku. Uvnitř je konstantanový vodič připájený nebo přivařený k železnému tělesu. Nevýhodou je horší odolnost proti korozi.

Tab. 2 Přehled nejčastěji používaných termočlánků :

| Označení | T (Cu-ko) | J (Fe-ko) | K (CH-A) | S (PtRh-10Pt) | B (PtRh30-PtRh6) |
|--------------------------------------|----------------------|--|--|--|---|
| rozsah [°C] krátkodobě | -200 ÷ 400 600 °C | -200 ÷ 600 900 °C | -50 ÷ 1 000 1 300 °C | 0 ÷ 1 300 1700 °C | 1 000 ÷ 1 600 1 800 °C |
| termoelektr. napětí mV/100°C | 4,25 | 5,37 | 4,8 | 0,64 | |
| dovolená odchylka [°C] | | -100÷400 °C ± 3°C do 900 °C podle $\pm[3+7,5 \cdot 10^{-3} \cdot (t-400)]$ | do 400 °C ± 4°C od 400 °C podle $\pm[3+5 \cdot 10^{-3} \cdot (t-400)]$ | do 600 °C ± 3°C od 600 °C podle $\pm[3+5 \cdot 10^{-3} \cdot (t-600)]$ | od 600 °C podle $\pm[3+5 \cdot 10^{-3} \cdot (t-600)]$ |
| barevné označení | hnědý | modrý | žlutý (NiCr-Ni zelený) | bílý | |
| odolnost v oxidačním prostředí | malá | malá nutno chránit | velká | velká nad 1200 chránit | velká |

| | | | | | |
|--------------------------------------|--|-------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| odolnost v redukčním prostředí | | velká | | malá nutno chránit | malá nutno chránit |
| malá odolnost | | | SO ₂ , SO ₃ | chránit před Si,P | |

Termočlánek niklchrom-nikl. Je to často užívaný termočlánek (typu K) pro oblast vyšších teplot. Kladný element je slitina niklu a chromu, záporným je nikl. Jeho kalibrační křivka se blíží přímce.

Jiné provedení termočlánu typu K je z materiálů s výrobním označením CHROMEGA ©, který představuje kladný článek a ALOMEGA ©, jako záporný element.

Dále se používají niklmolybden-niklměď, stříbro-konstantan, železo-nikl, niklchrom-konstantan, grafit-nikl, wolfram-wolframmolybden, niklželezo-nikl, platina-platinarhodium, platina-platinairidium, wolframrhenium (tungsten)-rhenium, atd.

3. Měření teploty v ohništích fluidních kotlů

Měření teploty v ohništích fluidních kotlů lze z hlediska absolutní hodnoty naměřených teplot rozdělit do dvou základních skupin. U klasické stacionární fluidní vrstvy tvořené převážně částicemi popela, případně u kotlů s cirkulující fluidní vrstvou dosahuje spalovací teplota úrovně cca $800 \div 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a měření teploty lze provést běžným typem termočlánku typu „K“.

Naproti tomu teplota fluidní vrstvy kotlů typu Ignifluid se škvárující fluidní vrstvou dosahuje místy teploty $1200 \div 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, což je pro běžné typy termočlánků na hranici materiálových možností.

Měření teploty není samozřejmě zaměřeno pouze na teplotu fluidní vrstvy, ale zahrnuje požadavky rovněž na měření teplot spalín v celém spalínovém traktu kotle.

3.1 Měření teploty provozními teploměry

U granulačních kotlů se teploty spalín ve spalovací komoře zpravidla vůbec neměří, protože spalovací teploty jsou nad hranicí spolehlivého kontaktního měření. V případě potřeby se měří teploty bezkontaktními měřicími přístroji, případně ultrazvukem. U fluidních kotlů měříme teplotu ve spalovací komoře fluidních kotlů zásadně kontaktním způsobem, nasazení ultrazvukového nebo optického měření dosud literární podklady neuvádí, přestože by pravděpodobně přineslo zajímavé poznatky.

Provozní měření teploty v kotlích s fluidní vrstvou používáme různé typy provozních měřidel teploty s ohledem na umístění příslušného teploměru a prostředí, ve kterém pracuje.

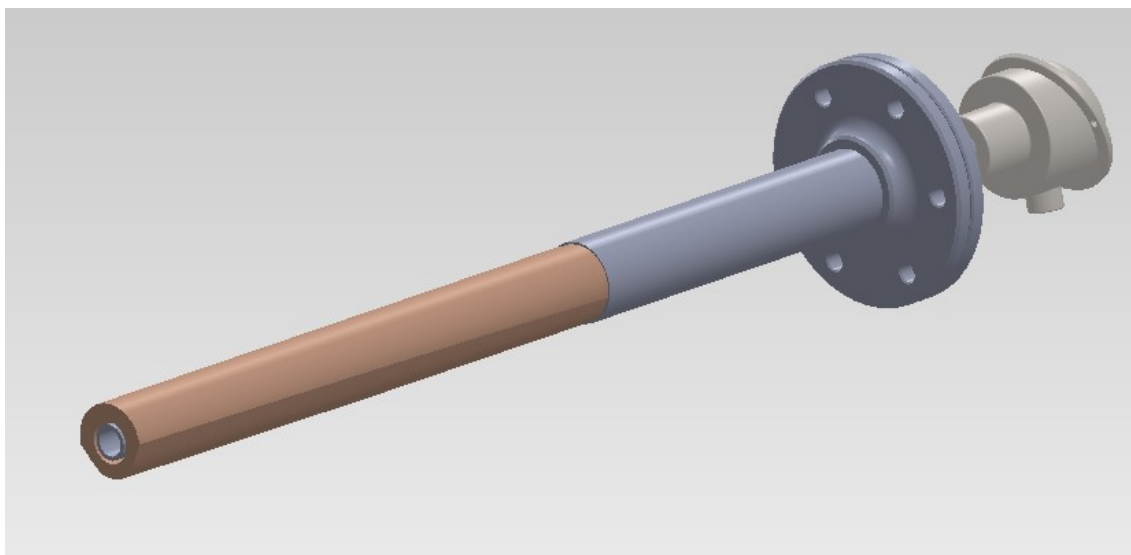
Pokud rozebereme umístění teploměrů po spalovací dráze ve směru proudění spalín jsou první teploměry instalovány ve spodní části fluidní vrstvy. Další teploměry jsou umístěny zpravidla uprostřed spalovací komory a dále na výstupu ze spalovací komory do systému cyklónů nebo sedimentačních komor. V tzv. zadních tazích je již rozmístění teploměrů obvyklé pro všechny typy kotlů. V diplomové práci se budu zabývat pouze měřením teplot ve fluidní spalovací komoře.

S ohledem na teploty spalování v oblasti $800 \text{ až } 900^{\circ}\text{C}$ jsou teploměry vystaveny z hlediska materiálových možností značnému namáhání. V oblasti těchto teplot běžné materiály na bázi železa a jeho slitin ztrácejí pevnost a nelze připustit jejich zvýšené mechanické namáhání. Toto je hlavním důvodem, proč tyto teploměry mají zpravidla činnou část vsunutou do fluidní vrstvy cca 150 až 200 mm. Hlubší vsunutí do spalovací komory by bylo jistě žádoucí, ale použitý materiál pro výrobu teploměrů toto

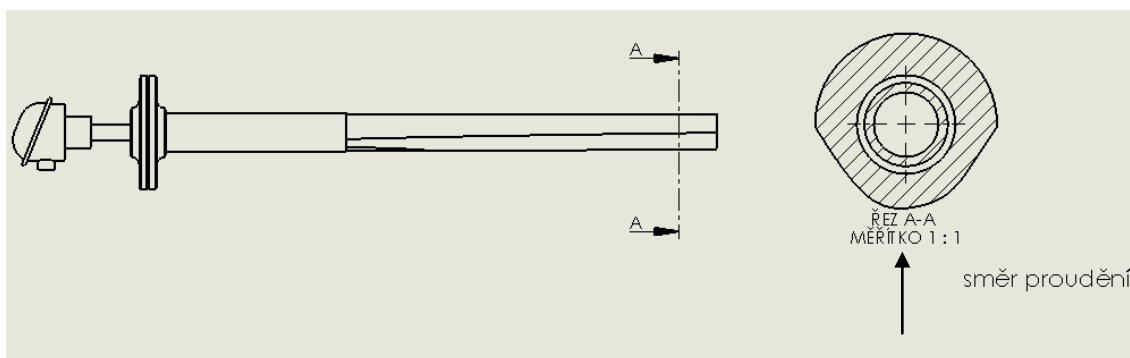
neumožňuje. Ve fluidní vrstvě a zejména v jeho spodní části existuje významný dynamický účinek proudících částic. Nad přívody primárního vzduchu existuje proudění částic převážně směrem vzhůru. Toto proudění se v čase mění, a lze počítat s poměrně značným nepravidelným dynamickým namáháním teploměru. Naštěstí se zpravidla do této oblasti s provozním měřením vůbec nedostaneme. S ohledem na hloubku zasunutí teploměru do fluidní vrstvy cca 150 až 250 mm jsme u fluidního ohniště vždy v oblasti sestupného proudu tuhé fáze a zpravidla i spalín. V tomto místě existuje dynamické zatížení, které je proměnné s výkonem kotle. S ohledem na pravděpodobnou vyšší hustotu tuhé fáze v těchto místech bude dynamické namáhání teploměru v podstatě podobné jako ve vzestupném proudu tuhé fáze.

Dalším problémem jsou abraze ve fluidní vrstvě. Proud plynné a tuhé fáze s částicemi popela a paliva v různém stupni vyhoření působí abrazivně na tlakový celek i na jiné vložené části do fluidní vrstvy. Z tohoto důvodu jsou spodní části fluidní vrstvy opatřeny v oblasti výparníku žárobetonovým omazem. Stejná pravidla z hlediska abrazí platí i pro tlakový celek výparníku nad omazem. V této oblasti musí být trubky důsledně vedeny svisle a musí mít pečlivě upraven povrch svaru mezi praporkem a trúbkou. Spodní část před přechodem k omazu je vyhnuta vně a nepřipouští se v této oblasti montážní sváry. Každý přívod vzduchu, prostup, nebo čidlo v této oblasti je zdrojem nepříjemností, které se objevují po několika tisících hodinách provozu. Opravy ploch návary tvrdokovu, tenké keramické nátěry a podobná opatření prodlouží periodu provozu, ale problém neřeší. Konečné řešení přinese pouze změna tvaru dotýčné plochy. Trvalo řadu let než výrobci eliminovali abraze u tlakového celku výparníku a pochopili, že fluidní vrstvu je nutno pečlivě řešit z aerodynamického hlediska a vzniku možných turbulencí podobně jako v leteckém průmyslu.

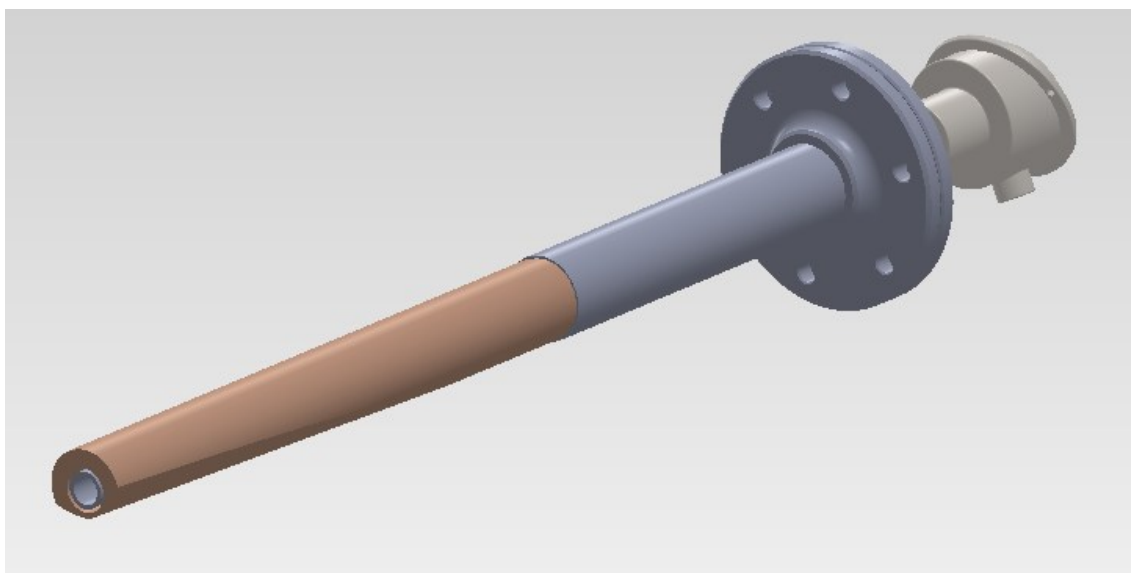
Abraze se pochopitelně týkají i teploměrů umístěných ve fluidní vrstvě. Tuhá fáze způsobuje otěr povrchu teploměru. Tvar otěru je závislý na granulometrii částic a rychlosti proudění. Při menších rychlostech, kdy může dojít k usazení a delšímu setrvání částic na náběžné straně čidla jsou opotřebovány převážně boční části čidla pod úhlem od 30° do 90° z obou stran symetricky (Obr. 8 a Obr. 9). Při vyšších rychlostech, kdy nedochází k usazování nebo setrvání tuhé fáze na náběžné hraně je abraze nejvyšší přímo ve směru proudění pod úhlem 0° a směrem k 90°, symetricky z obou stran postupně klesá (Obr. 10 a Obr. 11).



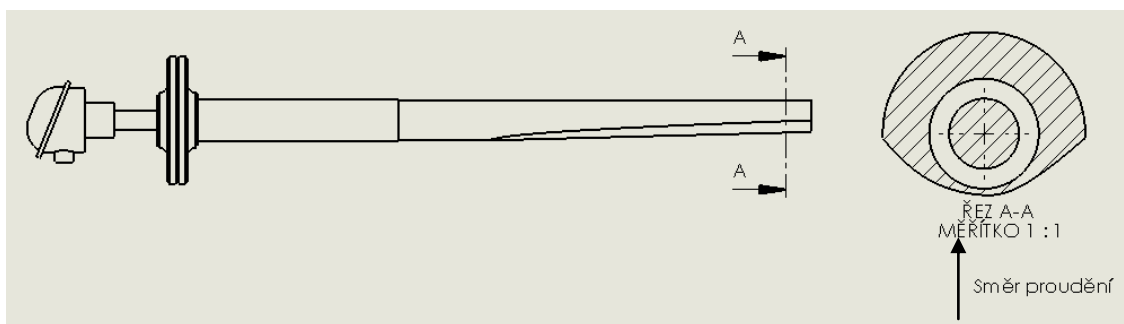
Obr. 8 Opotřebení vysokotlaké jímky abrazi ve střední části fluidní vrstvy



Obr. 9 Opotřebení vysokotlaké jímky abrazi ve střední části fluidní vrstvy (řez)



Obr. 10 Opotřebení vysokotlaké jímky abrazi ve spodní části fluidní vrstvy



Obr. 11 Opatření vysokotlaké jímky abrazi ve spodní části fluidní vrstvy (řez)

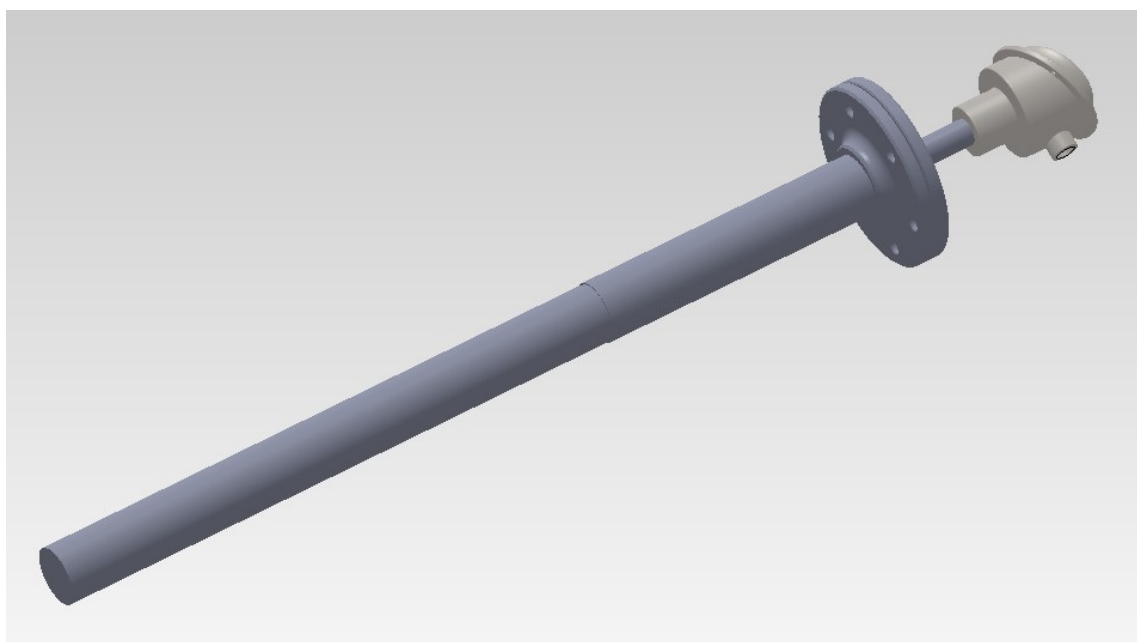
U fluidních kotlů můžeme potkat oba případy. Ve spodní části fluidní vrstvy se jedná o kombinaci obou případů. Směrem k zadnímu tahu kotle spíše dochází k usazování tuhé fáze na náběžné straně čidla a abraze působí ve směru proudění ze stran čidla.

Výrobci čidel se abrazí fluidní vrstvy brání pancéřováním čidla mohutnou ochrannou trubicí vyrobenou z tvrdokovu. Výsledkem je kompromis mezi tepelnou konstantou teploměru a velikostí (tloušťkou) ochranné vrstvy z tvrdokovu. V současné době je praxe taková, že čidla se mění v periodě cca 6000 až 8000 hodin, prakticky 1x ročně. Pro technickou praxi bychom potřebovali čidlo, které vydrží násobek současného počtu provozních hodin při zachování tepelné konstanty teploměru.

a) Výzkumné měření teploty ve stacionární případně cirkulující fluidní vrstvě

Zpravidla se jedná o měření teploty do maximální úrovně 1000 °C. Tuto teplotu je možno zvládnout běžnými plášťovým termočlánkem typu "K" (Ni-NiCr). Vzhledem k tomu, že termočlánek je v průběhu měření teploty vyhřátý na teplotu odpovídající průměrné teplotě fluidní vrstvy a má podstatně nižší tuhost než při 20 °C je nutno umístit tento termočlánek v tuhé žáruvzdorné trubce nebo v chlazené sondě. Při ověřovacích měřeních spodní části fluidní vrstvy byl odzkoušen plášťovaný termočlánek o vnějším průměru 6 mm. Termočlánek byl umístěn v chlazené sondě s vnitřním světlym průměrem 20 mm a vnějším průměrem chlazeného pláště 50 mm. Při měření termočlánkem vyčnívá ze sondy cca 200 mm. Při intenzivních přestupech je délka vysunutí dostatečná, pokles teploty vedením tepla pláštěm termočlánu do chlazené sondy je zanedbatelný. Schéma sondy pro měření teplot ve spodní části fluidní vrstvy je uvedeno na. (Obr. 12) Určité obtíže jsou však s vlastním vsunutím sondy do

spodní části fluidní vrstvy v kotli. Vzhledem k obavám z možných následků nekontrolovatelného výtoku fluidní vrstvy při manipulaci se sondou a ventilem. Běžné hodnoty statického tlaku ve spodní části fluidní vrstvy dosahují hodnot 5 až 10 kPa. Při měření byla odzkoušená metoda vsunutí sondy do kotle přes kulový ventil DN 80. Kulový ventil umožňuje manipulaci i při celkovém zanesení a zaplnění inertním materiálem. Ventil byl navařen na průlezový kryt vstupu na fluidní rošt cca 800 mm nad roštem. Za ventil byl navařen 600 mm dlouhý kousek potrubí DN 80. Před vsunutím sondy přes kulový ventil do fluidní vrstvy byl přechod mezi ventilem a sondou opatřen manžetou z ohnivzdorné tkaniny. Tato manžeta zároveň umožňuje axiální pohyb sondy do vrstvy a ven. Nehybnou část fluidní vrstvy mezi kulovým ventilem a vnitřní stěnou keramické žáruvzdorné vyzdívky kotle lze zpravidla bez problému sondu prorazit. Teplý konec termočlánku o se po vsunutí sondy do fluidní vrstvy vysune ven. Tímto je možno krátkodobě získat informace o teplotě fluidní vrstvy v daném místě s minimální tepelnou konstantou použitého čidla.



Obr. 12 Sonda pro měření teploty ve spodní fluidní vrstvě

3.1.1 Srovnání měření teplot na vstupu do cyklónu provozním teploměrem a s výzkumným měřením teploty

Na katedře energetiky bylo provedeno v minulosti měření kotle 350 t.h^{-1} při najíždění ze studeného stavu. Měření bylo provedeno při najíždění dne 19.9.1998. Jedná se o termočlánek $\phi 3 \text{ mm}$ umístěný v přechodovém kanálu na výstupu spalín ze spalovací komory do cyklónu. Z grafu jsou patrné zejména prudké nárůsty teplot při zahájení dávkování uhlí do fluidní vrstvy, případně jakékoliv náhlé zvýšení výkonu zauhlovacích tras, případně najetí plynového hořáku při kombinovaném spalování uhlí a plynu. Na Obr. č. je znázorněn průběh tohoto najíždění při měření teploty termočlánkem $\phi 3 \text{ mm}$ na konci spalovací komory (hodnoty VŠB- TU Ostrava) a měření teploty provozními teploměry ve spalovací komoře. Z měření vyplývá, že provozní teploměry jsou velmi dobře chráněny proti abrazi. Důsledkem je vysoká tepelná konstanta provozního teploměru, který není schopen věrohodně zobrazit skutečné teploty v průběhu najíždění. V některých okamžicích byly rozdíly mezi provozním měřením a skutečnou teplotou až $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tento rozdíl je dosti významný a zejména u větších kotlů by měl být řešen teploměry s nižší tepelnou konstantou a tím i rychlou odezvou. Na základě těchto skutečností jsem řešil v diplomové práci návrh nového typu teploměru s rychlou odezvou a solidní ochranou proti abrazi.

4. Popis kotle K11

4.1 Parní kotel

Kotelní jednotka je sálavý jednobubnový kotel s přirozenou cirkulací parovodní směsi. Stěny výparníku I. a II. tahu jsou vyhotovené jako membránové. Kotel je dvoutahový, mezi tahy jsou umístěné 2 cyklóny (Obr. 13).

Tab. 3 Technické parametry kotle K11

| | | |
|---------------------------------|--------|-------------------|
| Jmenovitý výkon kotle | 160 | t.h ⁻¹ |
| Jmenovitý teplotní výkon kotel | 126,8 | MW |
| Jmenovitý tlak přehřáté páry | 9,6 | MPa |
| Nejvyšší tlak přehřáté páry | 12,2 | MPa |
| Jmenovitá teplota přehřáté páry | 540 ±5 | °C |
| Nejvyšší teplota přehřáté páry | 560 | °C |
| Jmenovitá teplota napájecí vody | 150 | °C |

První tah tvoří fluidní spalovací komora, ve spodní části vybavená fluidním roštem. V druhém tahu jsou v jeho horní části umístěné přehřívače 2 a 3 a EKO 2, ve spodní části v plechovém kanálu jsou umístěné LUVO 1 a 2 a EKO1. Další výhřevné plochy, část výparníku a přehřívače 1 jsou umístěné v chladiči fluidní vrstvy.

Výparník, kotelní těleso, přehřívač a EKO 2 jsou zavěšené na stropě nosné konstrukce kotle a dilatují směrem dolů. Trubkové ohřívače vzduchu 1 a 2 a EKO 1 jsou uloženy na nosné konstrukci kotle a dilatují směrem nahoru.

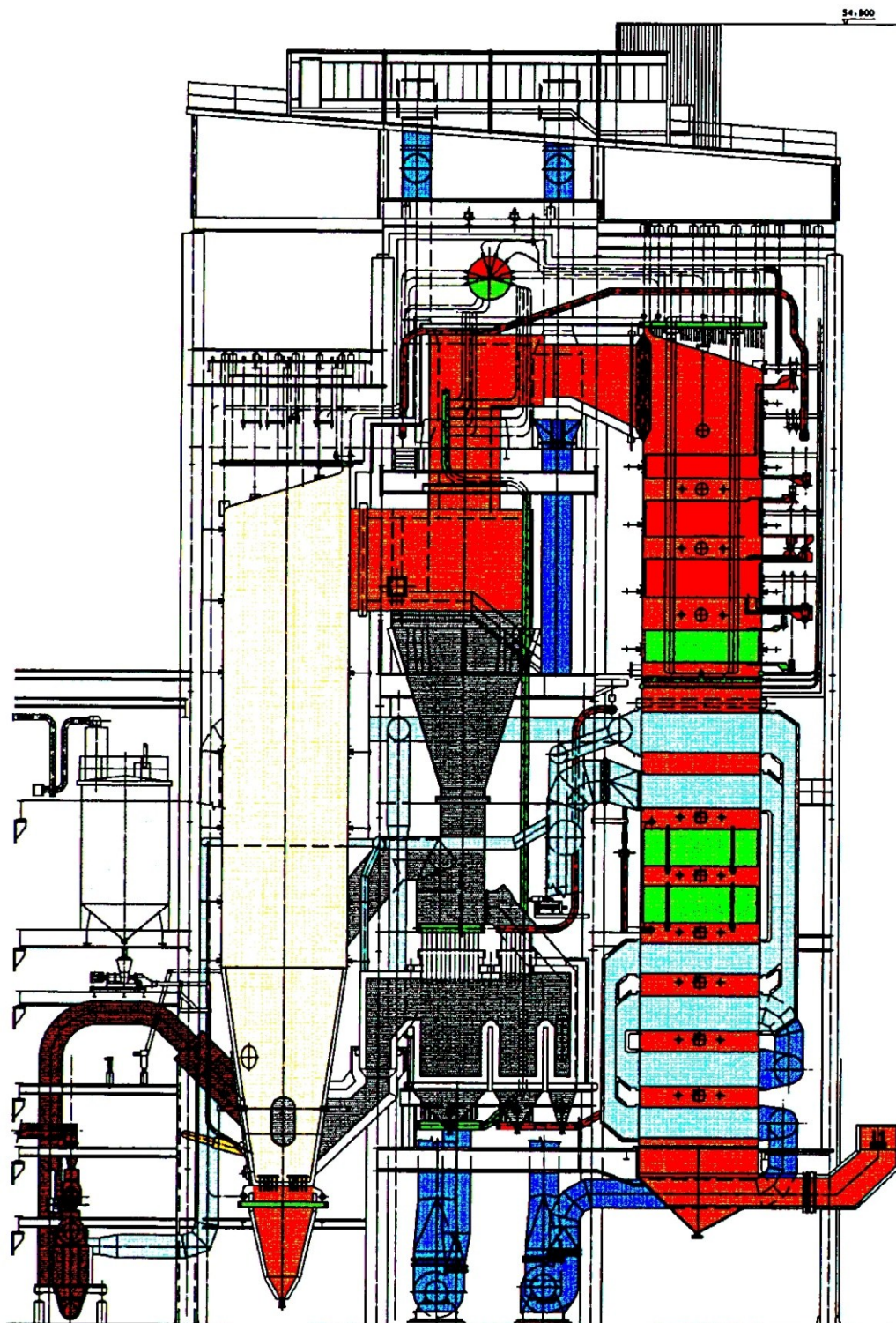
Regulace teploty přehřáté páry je zabezpečena vstřikováním napájecí vody mezi přehřívače 1 a 2 (V1) a mezi přehřívače 2 a 3 (V2).

Kotel má dvoustupňový ohřívač vody. Ohřívač vody 1 je umístěný v spalínovém kanálu mezi LUVEM 1 a 2. Je dvoudílný, bloky jsou vytvořené z jednoduchých hadů a je zapojený jako protiproudý. Ohřívač vody 2 je jednodílný z jednoduchých hadů, umístěný je ve II. tahu mezi přehřívačem 2A a LUVEM 2. Zapojený je jako protiproudý. Jednotlivé ohřívače vody jsou propojené s bubnem propojovacím potrubím.

Mezi jednotlivými bloky přehřívačů, ohřívačů vody a ohřívač vzduchu jsou zařazené parní ofukovače typu BERGEMANN.

Pod spalovací komorou je umístěná výsypka, do které se přivádí spalovací vzduch, proudící do fluidního roštu.

GO s MORE kotla K11 s CFV
160 t/h, 96 bar, 540 °C



Obr. 13 Fluidní kotel K11

Kotel je vybavený dvěma zapalovacími hořáky na zemní plyn, které jsou umístěné na zadní stěně spalovací komory.

Pro zajištění dopravy a spalování slouží 2 vzduchové ventilátory (primární a sekundární). Primární vzduchový ventilátor dodává vzduch pod fluidní rošt spalovací komory a pro 4 ks dýz vysokopecního plynu. Sekundární vzduchový ventilátor dodává vzduch do dvou drtičů uhlí jako nosné médium drceného uhlí, do dvou zapalovacích hořáků na zemní plyn a do dvou dýz na zemní plyn. Hořáky a dýzy na zemní plyn jsou umístěné na zadní stěně spalovací komory. 2 ks dýz na vysokopecní plyn jsou umístěné na přední a 2 ks na zadní stěně spalovací komory.

Mezi I. a II. tahem ve směru proudění spalin jsou umístěné 2 cyklóny na oddělení fluidizace schopných částic ještě nedopáleného uhlí a částic popele. Tyto částice se vracejí přes fluidní uzávěry zpět do spalovací komory, čímž vzniká cirkulující fluidní vrstva a je zabezpečené dokonalé spálení částic uhlí.

Ve spodní části spalovací komory, těsně nad dnem je na zadní stěně umístěný speciální vypouštěcí uzávěr na vypouštění popele do chladiče popela.

4.2 Spalovací zařízení

Spalovací zařízení s vířivou fluidní vrstvou se skládá v podstatě z komponentů: spalovací komora, cyklóny a chladič fluidní vrstvy.

Spalovací komora je obdélníkového (pravoúhlého tvaru) se vzduchotěsně svařenými trubkovými stěnami. Ve spodní oblasti je SK zúžená, aby mohly být zachované i při hrubých částicích popele dostatečně velké rychlosti proudění. Spodní část SK je opatřena z vnitřní strany ohnivzdornou omítkou. Ukončení spodní části tvoří trubkový dýzový rošt s vzduchovou skříní, přes kterou je přehřátý primární (spalovací) vzduch (260 °C) tlačенý do spodní části SK.

Spalovací komora obsahuje ve spodní části hrdla a otvory pro přidávání paliva, vápna, popele jako a předehřívací hořáky, hořáky plynové a hořáky pro vysokopecní plyn.

Spalování dodaného uhlí se uskutečňuje ve fluidní spalovací komoře při teplotě cca 850 °C. Fluidní vrstva se skládá hlavně z vyhořených částic uhlí - popel, z oxidu vápníku a ze sulfátu vápníku. Spalovací vzduch a spalovací plyny tvoří vířivé médium pro palivo a odsiřovací prostředky.

Palivo je spalované s poměrovým číslem vzduchu λ 1,2. Jedna část spalovacího vzduchu, cca 40 % je přidávána přes dýzový rošt a vysokopecní hořáky do fluidní spalovací komory, zatímco zbývající část je přiváděna nad rošt.

Na základě tohoto stupňovitého rozdělení vzduchu a nízkých spalovacích teplot je zabráněno tvoření termického NO_x .

Vlivem různého rozdělení vzduchu ubývá (klesá) koncentrace pevných látek ve fluidním ohništi s rostoucí výškou fluidní vrstvy.

Velký specifický povrch vířených pevných částic příznivě ovlivňuje tepelné a přechodové procesy mezi látkami:

- částice a spaliny (odsíření)
- částice a výhřevná plocha (přechod tepla)
- částic navzájem (vyrovnávání teploty)

Spalinami jsou pevné látky kontinuálně vynášené ze spalovací komory a jsou oddělovány v následně zařazených vratných cyklónech od spalin. Odloučené pevné látky jsou přiváděny s teplotou cca 850 °C do fluidní spalovací komory. Část popele je vedena přes chladič fluidní vrstvy, kde je popel ochlazován výměníkovými plochami. Touto externí cirkulací pevných látek je zaručena dobrá konstantní teplota v celé fluidní spalovací komoře a ve vratných cyklónech.

Spaliny, bohaté na popel, jsou zbavené jemného popele ve dvou vysoko-výkonných cyklónech. Ocelový plechový plášť cyklónů je na vnitřní straně opatřen ohnivzdornou vyzdívkou, včetně izolační vrstvy.

Chladič fluidní vrstvy je zařízení, které se skládá z různých průtokových, přepážkami oddělených komor, ve kterých jsou zavěšeny svazky výměníku tepla. Různě nastavené tlakové poměry v jednotlivých komorách zabezpečují přetékání popele z jedné komory do druhé.

5. Účinnost kotle

5.1 Účinnost spalovacích zařízení

Spalovací zařízení slouží k přeměně chemicky energie vázané v palivu na tepelnou energii média, vhodného k žádoucí distribuci tepla pro vytápění, nebo pro další transformaci na jiné formy energie. Účinnost je ukazatelem dokonalosti transformace energie, je nejvýznamnějším technickoekonomickým parametrem spalovacího zařízení a udává míru využití energie paliva. Nevyužitá energie představuje ztráty, ať už ve formě tepla nebo nespáleného paliva. Obecně účinnost vyjadřuje poměr mezi výkonem a příkonem.

$$\eta = \frac{\text{výkon}}{\text{příkon}} = \frac{P_v}{P_p} \quad [1] \quad (8)$$

P_v – množství energie přivedené do zařízení v palivu

P_p – množství tepla obsaženého ve vodní páře popřípadě v jiných látkách

Výpočet účinnosti spalovacích zařízení vyžaduje provedení náročných měření a analýz. Aby byly získané výsledky vzájemně srovnatelné, provádí se výpočty stejnou metodikou. Postup výpočtu účinnosti je podrobně určen v příslušných normách. Pro kotle je to norma ČSN 07 0302 – Přejímací zkoušky parních kotlů a ČSN EN 12952-15 – Vodotrubné kotle a pomocná zařízení - Část 15: Přejímací zkoušky.

5.2 Metoda přímá

Přímá metoda je založená na přesné znalosti množství přivedeného paliva do kotle vlastně jeho výhřevnosti, účinnost potom můžeme určit prostým poměrem výkonu k výkonu (1). Výkon zařízení lze snadno změřit. Tato metoda je použitelná u topenišť kde jsme schopni přesně určit množství paliva. U velkých parních zařízení spalující tuhá paliva je použití této metody nevhodné, protože je nemožné, určit přesně spotřebu paliva pro stanovení tepelného příkonu přivedeného v palivu. Určení účinnosti metodou přímou tedy nelze vždy použít a navíc nemá takový postup dostatečnou vypovídající hodnotu. Zjistíme sice hodnotu účinnosti, ale nevíme na příklad proč je tak nízká a kde se energie ztrácí. Proto je výhodné použít metodu nepřímou.

5.3 Metoda nepřímá

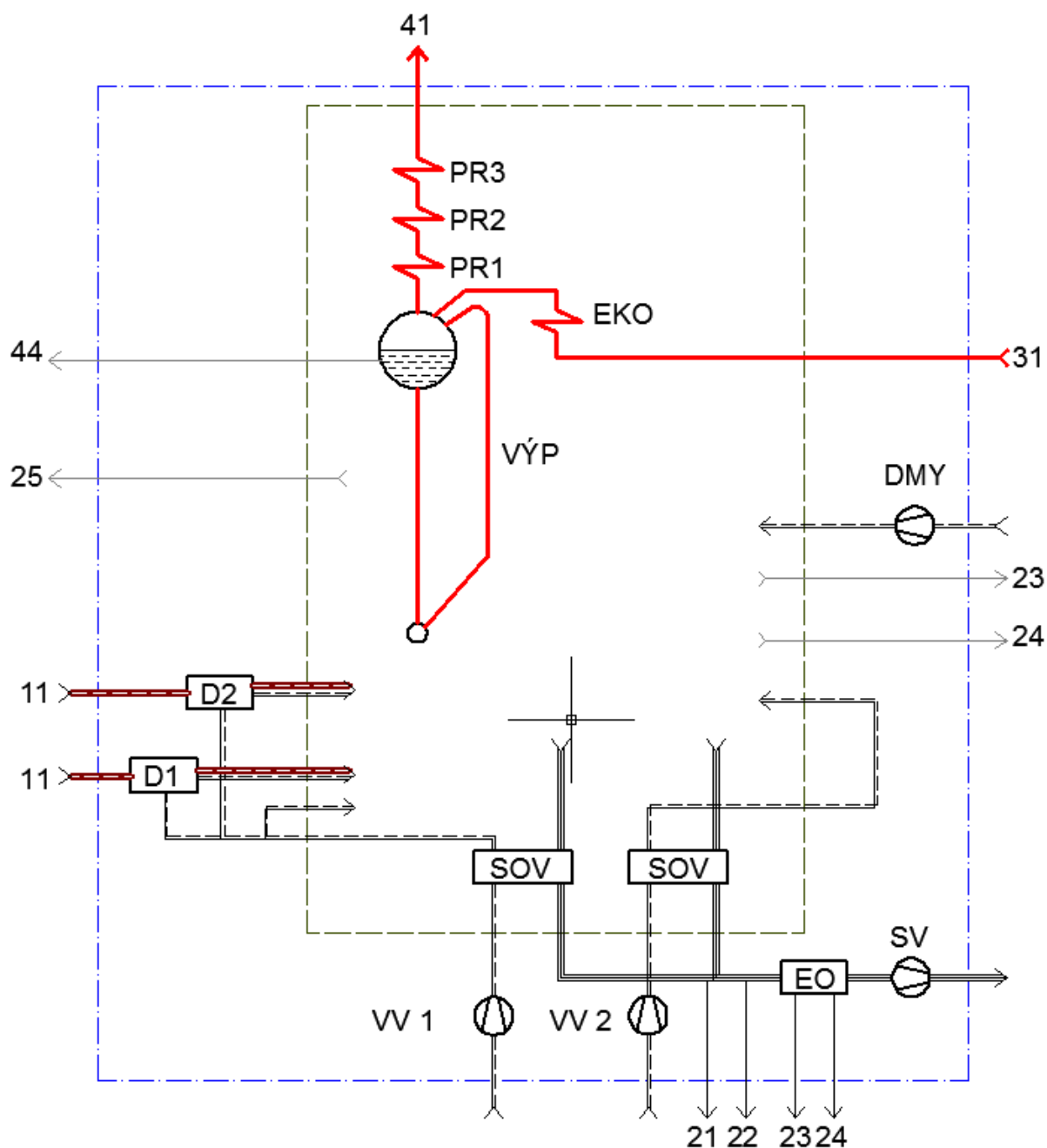
Nepřímo se určuje účinnost pomocí poměrných tepelných ztrát, podle vztahu :

$$\eta = 1 - \zeta_{CO} - \zeta_C - \zeta_k - \zeta_f - \zeta_{sv} \quad (9)$$

5.3.1 Základní rozdělení kotlových ztrát

- ζ_c, ζ_{co} – ztráta nedopalem (ztráta nespálenou hořlavinou), udávající jakou část z původní hořlaviny se nepodařilo spálit a tato část původní hořlaviny opouští kotel ve formě tuhých a plynných hořlavých složek.
- ζ_k – ztráta komínová (ztráta citelným teplem spalin), která vyjadřuje ztrátu ve spalinách za kotlem (přesněji za poslední teplosměnnou plochou), které již není dále využito a odchází komínem do ovzduší.
- ζ_f – ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků, respektující skutečnost, že také zbytky po spalování (v ideálním případě popelovina) opouštějí kotel s nezanedbatelnou teplotou a odvádějí tak značné množství nevyužitého tepla.
- ζ_{sv} – ztráta sdílením tepla do okolí, vyjadřující množství tepla, předaného do okolí z vnějšího povrchu kotle.

Obě metody, jak přímá tak i nepřímá, jsou z hlediska fyzikálního i matematického rovnocenné, avšak použití metody nepřímé je mnohem výhodnější, protože zjistíme velikost jednotlivých poměrných ztrát a můžeme pracovat na jejich omezení



| | |
|---------------|--|
| — · — · — · — | hranice soustavy PK s pomocným zařízením |
| — — — — — | hranice vlastního PK |
| ————— | hlavní průtok vody a páry |
| ===== | palivo |
| ===== | spaliny |
| ===== | vzduch |
| ————— | tuhé zbytky, ztráty |

| | |
|---|-------------------------------------|
| 1 – teplo chemicky vázané v palivu | 25 – ztráta sdílením tepla do okolí |
| 21 – ztráta hořlavinou ve spalínách | 31 – teplo v napájecí vodě |
| 22 – ztráta fyzickým teplem spalín | 41 – teplo v přehřáté páře |
| 23 – ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích | 44 – teplo v odluhu |
| 24 – ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků | |

6.2 Rozbor paliva

- Hrubý rozbor dodán laboratoří TŽ a.s.:

Tab. 4 Hrubý rozbor černého uhlí

| černé uhlí | | |
|------------|--------|----------------------------------|
| W_t^r | 0,088 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| A^d | 0,291 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| V^{daf} | 0,295 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| S^d | 0,0062 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| Q_i^r | 20950 | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ |

6.2.1 Převod hrubého rozboru paliva na prvkový (podle J. Snížka)

- a) přepočet obsahu popela v analytickém vzoru na obsah popela v surovém palivu:

- černé uhlí:

$$A^r = A^d \cdot (1 - W_t^r) \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10)$$

$$A^r = 0,291 \cdot (1 - 0,088) \cong 0,2654 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- b) přepočet výhřevnosti paliva na výhřevnost hořlaviny:

$$Q_i^{daf} = \frac{1}{1 - W_t^r - A^r} \cdot (Q_i^r + 24,5 \cdot W_t^r) \quad [\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (11)$$

$$Q_i^{daf} = \frac{1}{1 - 0,0088 - 0,2654} \cdot (20950 + 24,5 \cdot 0,088) \cong \underline{32734 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

c) přepočítání obsahu síry v analytickém vzoru na obsah síry v hořlavině:

$$S^{daf} = S^d \cdot \frac{1}{1 - A^d} \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (12)$$

$$S^{daf} = 0,0062 \cdot \frac{1}{1 - 0,291} \cong \underline{0,0087 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

d) odečtení hodnot obsahů prvků organické hmoty z diagramu v příloze:

Tab. 5 Obsah organické hmoty

| Černé uhlí | | |
|----------------|--------|---------------------|
| C ⁰ | 0,8266 | kg.kg ⁻¹ |
| H ⁰ | 0,0548 | kg.kg ⁻¹ |
| O ⁰ | 0,104 | kg.kg ⁻¹ |
| N ⁰ | 0,0146 | kg.kg ⁻¹ |

e) přepočítání rozboru organické hmoty na prvkový rozbor hořlaviny

- černé uhlí:

$$C^{daf} = C^0 \cdot (1 - S^{daf}) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (13)$$

$$C^{daf} = 0,8266 \cdot (1 - 0,0087) \cong \underline{0,8194 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$H^{daf} = H^0 \cdot (1 - S^{daf}) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (14)$$

$$H^{daf} = 0,0548 \cdot (1 - 0,0087) \cong \underline{0,0543 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$O^{daf} = O^0 \cdot (1 - S^{daf}) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (15)$$

$$O^{daf} = 0,104 \cdot (1 - 0,0087) \cong \underline{0,1031 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$N^{daf} = N^0 \cdot (1 - S^{daf}) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (16)$$

$$N^{daf} = 0,0146 \cdot (1 - 0,0087) \cong \underline{0,0145 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

vždy musí platit:

$$C^{daf} + H^{daf} + O^{daf} + N^{daf} + S^{daf} = 1 \quad (17)$$

tedy: $0,8194 + 0,0543 + 0,1031 + 0,0145 + 0,0087 = \underline{1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$

f) přepočítání prvkového složení hořlaviny na prvkové složení vstupujícího do soustavy:

$$C^r = C^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (18)$$

$$C^r = 0,8194 \cdot (1 - 0,088 - 0,2654) \cong \underline{0,5298 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$H^r = H^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (19)$$

$$H^r = 0,0543 \cdot (1 - 0,088 - 0,2654) \cong \underline{0,0351 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$O^r = O^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (20)$$

$$O^r = 0,1031 \cdot (1 - 0,088 - 0,2654) \cong \underline{0,0667 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$N^r = N^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (21)$$

$$N^r = 0,0145 \cdot (1 - 0,088 - 0,2654) \cong \underline{0,0094 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$S^r = S^{daf} \cdot (1 - W_t^r - A^r) \left[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (22)$$

$$S^r = 0,0087 \cdot (1 - 0,088 - 0,2654) \cong \underline{0,0057 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

vždy platit:

$$C^r + H^r + O^r + N^r + S^r + A^r + W_t^r = 1 \quad (23)$$

Tedy:

$$0,5298 + 0,0351 + 0,0667 + 0,0094 + 0,0057 + 0,2654 + 0,088 = \underline{1 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Tab. 6 Prvkový rozbor

| černého uhlí | | | | | |
|--------------|---------|----------------------------------|---------|--------|----------------------------------|
| Q_i^r | 20178,7 | $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ | N^r | 0,0086 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| C^r | 0,5113 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | S^r | 0,0104 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| H^r | 0,0365 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | A^r | 0,1976 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
| O^r | 0,0910 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | W_t^r | 0,1447 | $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ |

6.3 Stechiometrické objemy spalovacího vzduchu a spalin

Stechiometrické objemy spalovacího vzduchu a vzniklých spalin pro dokonalé spalování se vypočtou z následujících rovnic.

- Minimální objem suchého vzduchu potřebného pro dokonalé spalování:

$$V_{vs\min} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left(\frac{C^r}{12,011} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,066} + \frac{O^r}{32,00} \right) \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (24)$$

$$V_{vs\min} = \frac{22,39}{0,2095} \cdot \left(\frac{0,5113}{12,011} + \frac{0,0365}{4,032} + \frac{0,0104}{32,066} + \frac{0,091}{32,00} \right) \cong \underline{5,2467 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

- Minimální objem suchých spalin vzniklých při dokonalém spalování:

$$V_{ss\min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r + \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r + \frac{22,4}{28,016} \cdot N^r + 0,7905 \cdot V_{vs\min} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (25)$$

$$V_{ss\min} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,5113 + \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0104 + \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0086 + 0,7905 \cdot 5,1090$$

$$V_{ss\min} = \underline{5,1090 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

- Minimální objem H₂O ve spalinách:

$$V_{sH_2O\min} = 11,1111 \cdot H^r + 1,243 \cdot W^r + (\nu - 1) \cdot V_{vs\min} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (26)$$

$$V_{sH_2O\min} = 11,1111 \cdot 0,0365 + 1,2433 \cdot 0,1447 + (1,01 - 1) \cdot 5,2467$$

$$V_{sH_2O\min} = \underline{0,6376 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Kde: $\nu = 1,01$ při $p_b = 98,449 \text{ kPa}$, $t_{v0} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\phi = 0,417$

- Stechiometrické objemy jednotlivých složek ve spalinách pro dokonalé spalování ze vzduchu:

$$V_{vCO_2} = 0,003 \cdot V_{vs\min} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (27)$$

$$V_{vCO_2} = 0,003 \cdot 5,2467 = \underline{0,0016 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot V_{vs\min} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (28)$$

$$V_{vN_2} = 0,7809 \cdot 5,2467 = \underline{4,0971 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$V_{vA_r} = 0,0093 \cdot V_{vsmin} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (29)$$

$$V_{vA_r} = 0,0093 \cdot 5,2467 = \underline{0,0488 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

- Stechiometrické objemy jednotlivých složek ve spalínách pro dokonalé spalování z hořlaviny:

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot C^r \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (30)$$

$$V_{sCO_2} = \frac{22,26}{12,011} \cdot 0,5113 = \underline{0,5113 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$V_{ssO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot S^r \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (31)$$

$$V_{ssO_2} = \frac{21,89}{32,066} \cdot 0,0104 = \underline{0,0071 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$V_{sN_2} = \frac{22,26}{28,016} \cdot N^r \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (32)$$

$$V_{sN_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot 0,0086 = \underline{0,0069 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

- Stechiometrické objemy jednotlivých složek ve spalínách pro nedokonalé spalování:

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot C^r \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (33)$$

$$V_{sCO} = \frac{22,41}{12,011} \cdot 0,5113 = \underline{0,9539 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

$$V_{O_2} = \frac{22,39}{12,011} \cdot C^r \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (34)$$

$$V_{O_2} = \frac{22,39}{12,011} \cdot 0,5113 = \underline{0,9531 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

6.4 Parametry spalín při dokonalém spalování

Ve spalovacích zařízeních se musí palivo spalovat s větším přebytkem vzduchu než je vypočítaný teoretický objem. Ani při tomto zvýšeném průtoku spalovacího vzduchu

však nelze zajistit dokonalé vyhoření paliva. To znamená, že část uhlíku neshoří vůbec a odchází ze spalovacího zařízení společně s tuhými zbytky (ložový a úletový popel). Další část uhlíku shoří nedokonale na plynnou složku CO a odchází ve spalinách.

Parametry charakterizující dokonalost (kvalitu) spalování:

a) Podíl uhlíku, který neshoří vůbec:

$$b = \frac{A^r}{C^r} \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot X_i}{1 - C_i} \left[kg \cdot kg^{-1} \right] \quad (35)$$

$$b = \frac{0,1976}{0,5113} \cdot \left(\frac{0,0028 \cdot 0,45}{1 - 0,0028} + \frac{0,0884 \cdot 0,55}{1 - 0,0884} \right) = \underline{0,0211 \text{ } kg \cdot kg^{-1}}$$

Kde: $i = (LP, \acute{U}P)$

- Hmotnostní podíl uhlíku v tuhých zbytcích dodán laboratoří ET a.s.:

$$C_{LP} = 0,0028 \text{ } kg \cdot kg^{-1}$$

$$C_{\acute{U}P} = 0,0884 \text{ } kg \cdot kg^{-1}$$

Stanovení popelové bilance bylo provedeno nejdříve odhadem, protože ještě nebyl znám hmotnostní tok paliva do spalovacího zařízení, a to $X_{LP} : X_{\acute{U}P}$ na 0,3 : 0,7. Po opakovaných výpočtech jsem se přiblížil k hodnotě hmotnostního toku paliva \dot{m}_{pal} a tím k hmotnosti zváženého množství ložového popela. Popelová bilance je tedy stanovena na:

$$X_{LP} = 0,45 \text{ } kg \cdot kg^{-1}$$

$$X_{\acute{U}P} = 0,55 \text{ } kg \cdot kg^{-1}$$

b) Podíl uhlíku nedokonale spáleného na CO:

$$a_1 = \frac{R7 \cdot \omega_{CO}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \left[kg \cdot kg^{-1} \right] \quad (36)$$

$$a_1 = \frac{5,5104 \cdot 1,162 \cdot 10^{-4}}{-5,0048 \cdot 0,0395 + 1,9694 \cdot 1,162 \cdot 10^{-4} + 1,0485} = \underline{7,5 \cdot 10^{-4} \text{ } kg \cdot kg^{-1}}$$

- Součinitel přebytku vzduchu:

$$\alpha_1 = \frac{R4 \cdot \omega_{O_2} + R5 \cdot \omega_{CO+R6}}{R1 \cdot \omega_{O_2} + R2 \cdot \omega_{CO} + R3} \quad (37)$$

$$\alpha_1 = \frac{-0,1312 \cdot 0,0395 - 0,4556 \cdot 1,162 \cdot 10^{-4} + 1,0293}{-5,0048 \cdot 0,0395 + 1,9694 \cdot 1,162 \cdot 10^{-4} + 1,0485} = \underline{1,2033}$$

- Přepočet korigované hodnoty CO na skutečný stav:

$$c_{CO} = c_{CO,r} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - 6} \left[mg \cdot m^3 \right] \quad (38)$$

$$c_{CO} = 132,4 \cdot \frac{21 - 4,54}{21 - 6} = \underline{145,3 \, mg \cdot m^{-3}}$$

kde referenční kyslík $O_{2r} = 6 \, \%$

- Výpočet objemového podílu CO ve směsi plynů v suchých spalínách:

$$\omega_{CO} = c_{CO} \cdot \frac{1}{\rho_{CO} \cdot 10^6} \left[m \cdot m^{-3} \right] \quad (39)$$

$$\omega_{CO} = 145,3 \cdot \frac{1}{1,25 \cdot 10^6} = \underline{1,162 \cdot 10^{-4} \, m^3 \cdot m^{-3}}$$

$$\rho_{CO} = \frac{M_{mol}}{V_{mol}} \left[kg \cdot m_N^{-3} \right] \quad (40)$$

$$\rho_{CO} = \frac{28,01}{22,4} \cong \underline{1,25 \, kg \cdot m_N^{-3}}$$

molární hmotnost: $M_{mol} = 28,01 \, kg \cdot kmol^{-1}$

molární objem: $V_{mol} = 22,4 \, m^3 \cdot kmol^{-1}$

- Vyjádření konstant R1 až R7 pro dané palivo:

$$R1 = -V_{vs \, \min} \cdot V_{s \, CO} \left[- \right] \quad (41)$$

$$R1 = -5,2467 \cdot 0,9539 = \underline{-5,0048}$$

$$R2 = V_{vs \, \min} \cdot \left(0,5 \cdot V_{O_2} (C) - 0,2095 \cdot V_2 \right) \left[- \right] \quad (42)$$

$$R2 = 5,2467 \cdot \left(0,5 \cdot 0,9531 - 0,2095 \cdot 0,4829 \right) = \underline{1,9694}$$

$$R3 = 0,2095 \cdot V_{vs \, \min} \cdot V_{s \, CO} \left[- \right] \quad (43)$$

$$R3 = 0,2095 \cdot 5,2467 \cdot 0,9539 = \underline{1,0485}$$

$$R4 = V_{sCO} \cdot (V_1 + b \cdot V_3) [-] \quad (44)$$

$$R4 = 0,9539 \cdot (-0,1377 + 0,0211 \cdot 0,0055) = \underline{-0,1312}$$

$$R5 = V_2 \cdot (b \cdot V_{O_2}(C) - 0,2095 \cdot V_{vsmin}) - 0,5 \cdot V_{O_2}(C) \cdot (V_1 + b \cdot V_3) [-] \quad (45)$$

$$R5 = 0,4829 \cdot (0,0211 \cdot 0,9531 - 0,2095 \cdot 5,2467) - 0,5 \cdot 0,9531 \cdot (-0,1377 + 0,0211 \cdot 0,0055) = \underline{-0,4556}$$

$$R6 = V_{sCO} \cdot (0,2095 \cdot V_{vsmin} - b \cdot V_{O_2}(C)) [-] \quad (46)$$

$$R6 = 0,9539 \cdot (0,2095 \cdot 5,2467 - 0,0211 \cdot 0,9531) = \underline{1,0293}$$

$$R7 = V_{vsmin} \cdot (0,2095 \cdot (V_1 + b \cdot V_3) + 0,2095 \cdot V_{vsmin} - b \cdot V_{O_2}(C)) [-] \quad (47)$$

$$R7 = 5,2467 \cdot \left(0,2095 \cdot (-0,1377 + 0,0211 \cdot 0,0055) + 0,2095 \cdot 5,2467 - 0,0211 \cdot 0,9531 \right) \cong \underline{5,104}$$

Přičemž platí:

$$V_1 = V_{ssmin} - V_{vsmin} [-] \quad (48)$$

$$V_1 = 5,1090 - 5,2467 = \underline{-0,137}$$

$$V_2 = V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} [-] \quad (49)$$

$$V_2 = 0,9539 + 0,5 \cdot 0,9531 - 0,9475 = \underline{0,4829}$$

$$V_3 = V_{O_2}(C) - V_{sCO_2} [-] \quad (50)$$

$$V_3 = 0,9531 - 0,9475 = \underline{0,0055}$$

- Hodnota součinitele přebytku vzduchu za parním kotlem:

$$\alpha_k = \frac{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R4 \cdot (\omega_{O_2})_k + R6) + a_1 \cdot R5 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)}{(R7 - a_1 \cdot R2) \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3) + a_1 \cdot R2 \cdot (R1 \cdot (\omega_{O_2})_k + R3)} [-] \quad (51)$$

$$\alpha_k = \frac{(5,51 - 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,969) \cdot (-0,131 \cdot 0,0454 + 1,029) + (5,51 - 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,969) \cdot (-5,005 \cdot 0,0454 + 1,049) + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot (-0,456) \cdot (-5,005 \cdot 0,0454 + 1,049)}{+ 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1,969 \cdot (-5,005 \cdot 0,0454 + 1,049)} \cong \underline{1,2457}$$

- Objem suchých spalín vzniklý spálením 1kg paliva v místě na odchodu z PK:

$$V_{ss} = V_{ss\min} + a_1 \cdot (V_{sCO} + 0,5 \cdot V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + b \cdot (V_{O_2}(C) - V_{sCO_2}) + (\alpha_k - 1) \cdot V_{vs\min} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (52)$$

$$V_{ss} = 5,109 + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot (0,9539 + 0,5 \cdot 0,9531 - 0,9475) + 0,0211 \cdot (0,9531 - 0,9475) + (1,2457 - 1) \cdot 5,2467 = \underline{6,3984 \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right]}$$

- Objem vodní páry ve spalínách:

$$V_{sH_2O} = V_{sH_2O\min} + (\alpha_k - 1) \cdot (\nu - 1) \cdot V_{vs\min} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (53)$$

$$V_{sH_2O} = 0,6376 + (1,2457 - 1) \cdot (1,01 - 1) \cdot 5,2467 = \underline{0,6505 \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right]}$$

- Objem vlhkých spalín:

$$V_s = V_{ss} + V_{sH_2O} \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right] \quad (54)$$

$$V_s = 6,3986 + 0,6505 = \underline{7,0489 \left[m_N^3 \cdot kg^{-1} \right]}$$

6.5 Střední měrná tepelná kapacita spalín

- Obecný vztah střední měrné tepelné kapacity při teplotě (t):

$$\overline{c}_s(t) = \frac{A \cdot (t + 273) + B + \frac{C}{t + 273}}{V_s} \left[kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1} \right] \quad (55)$$

- Vyjádření konstant A, B, C v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu:

$$A = A_0 + \alpha \cdot A_\alpha \left[- \right] \quad (56)$$

$$A = 3,042 \cdot 10^{-4} + 1,2033 \cdot 8,22659 \cdot 10^{-4} = \underline{0,0013}$$

$$B = B_0 + \alpha \cdot B_\alpha \left[- \right] \quad (57)$$

$$B = 1,2041 + 1,2033 \cdot 6,4112 = \underline{8,9188}$$

$$C = C_0 + \alpha \cdot C_\alpha \left[- \right] \quad (58)$$

$$C = -75,2299 + 1,2033 \cdot 68,8266 = \underline{7,5914}$$

Hodnoty A(I), B(I), C(I) pro vybrané plyny, suchý vzduch a popílek jsou v tabulce
(Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.)

Tab. 7 Hodnoty A(I), B(I), C(I) pro vybrané plyny

| I | Složka | A(I) | B(I) | C(I) |
|---|------------------|-----------------------------|-----------|-------------|
| 1 | CO ₂ | $4,164\,716 \cdot 10^{-4}$ | 1,789 756 | -77,301 592 |
| 2 | SO ₂ | $2,578\,208 \cdot 10^{-4}$ | 2,028 744 | -87,341 506 |
| 3 | N ₂ | $1,324\,242 \cdot 10^{-4}$ | 1,219 579 | 12,392 970 |
| 4 | Ar | $-0,001\,547 \cdot 10^{-4}$ | 0,927 920 | 0,940 106 |
| 5 | H ₂ O | $2,939\,415 \cdot 10^{-4}$ | 1,325 136 | 23,236 609 |
| 6 | suchý vzduch | $1,538\,565 \cdot 10^{-4}$ | 1,208 695 | 12,885 736 |
| 8 | O ₂ | $1,745\,297 \cdot 10^{-4}$ | 1,267 865 | -2,515 435 |
| 9 | CO | $1,705\,545 \cdot 10^{-4}$ | 1,190 457 | 17,506 083 |

- Výpočet konstant pro známé složení spalin: A_0, B_0, C_0

$$A_0 = \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot A1 + V_{sSO_2} \cdot A2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot A3 + V_{vAr} \cdot A4 + \\ + V_{sH_2O} \cdot A5 - V_{vsmin} \cdot [A6 + (\nu - 1) \cdot A5] + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot A8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot A9 \quad [-] \quad (59)$$

$$A_0 = \left[(1 - 7,5 \cdot 10^{-4} - 0,0211) \cdot 0,9475 + 0,0016 \right] \cdot 4,164716 \cdot 10^{-4} + 0,0071 \cdot 2,578208 \cdot 10^{-4} + \\ + (0,0069 + 4,0971) \cdot 1,324242 \cdot 10^{-4} + 0,0488 \cdot (-1,547 \cdot 10^{-7}) + 0,6505 \cdot 2,939415 \cdot 10^{-4} - \\ - 5,2467 \cdot [1,538565 \cdot 10^{-4} + (1,01 - 1) \cdot 2,939415 \cdot 10^{-4}] + (0,5 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} + 0,0211) \cdot \\ \cdot 0,9531 \cdot 1,745297 \cdot 10^{-4} + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9539 \cdot 1,71289 \cdot 10^{-4} = \underline{0,000304}$$

$$B_0 = \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot B1 + V_{sSO_2} \cdot B2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot B3 + V_{vAr} \cdot B4 + \\ + V_{sH_2O} \cdot B5 - V_{vsmin} \cdot [B6 + (\nu - 1) \cdot B5] + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot B8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot B9 \quad [-] \quad (60)$$

$$B_0 = \left[(1 - 7,5 \cdot 10^{-4} - 0,0211) \cdot 0,9475 + 0,0016 \right] \cdot 1,789756 + 0,0071 \cdot 2,028744 + \\ + (0,0069 + 4,0971) \cdot 1,219579 + 0,0488 \cdot 0,92792 + 0,6505 \cdot 1,325136 - 5,2467 \cdot \\ \cdot [1,208695 + (1,01 - 1) \cdot 1,325136] + (0,5 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} + 0,0211) \cdot 0,9531 \cdot \\ \cdot 1,26785 + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9539 \cdot 1,190457 = \underline{1,2041}$$

$$C_0 = \left[(1 - a_1 - b) \cdot V_{sCO_2} + V_{vCO_2} \right] \cdot C1 + V_{sSO_2} \cdot C2 + (V_{sN_2} + V_{vN_2}) \cdot C3 + V_{vAr} \cdot C4 + V_{sH_2O} \cdot C5 - V_{vsmin} \cdot [C6 + (\nu - 1) \cdot C5] + (0,5 \cdot a_1 + b) \cdot V_{O_2}(C) \cdot C8 + a_1 \cdot V_{sCO} \cdot C9 \quad [-] \quad (61)$$

$$C_0 = \left[(1 - 7,5 \cdot 10^{-4} - 0,0211) \cdot 0,9475 + 0,0016 \right] \cdot (-77,301592) + 0,0071 \cdot (-87,341506) + (0,0069 + 4,0971) \cdot 12,39297 + 0,0488 \cdot 0,940106 + 0,6505 \cdot 23,236609 - 5,2467 \cdot [12,885736 + (1,01 - 1) \cdot 23,236609] + (0,5 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} + 0,0211) \cdot 0,9531 \cdot 17,506083 + 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9539 \cdot (-123,755162) = \underline{-75,2299}$$

$$A_\alpha = V_{vsmin} \cdot [A6 + (\nu - 1) \cdot A5] \quad [-] \quad (62)$$

$$A_\alpha = 5,2467 \cdot (1,538565 \cdot 10^{-4} + (1,01 - 1) \cdot 2,939415 \cdot 10^{-4}) = \underline{8,22659 \cdot 10^{-4}}$$

$$B_\alpha = V_{vsmin} \cdot [B6 + (\nu - 1) \cdot B5] \quad [-] \quad (63)$$

$$B_\alpha = 5,2467 \cdot (1,208695 + (1,01 - 1) \cdot 1,325136) = \underline{6,4112}$$

$$C_\alpha = V_{vsmin} \cdot [C6 + (\nu - 1) \cdot C5] \quad [-] \quad (64)$$

$$C_\alpha = 5,2467 \cdot (12,885736 + (1,01 - 1) \cdot 23,236609) = \underline{68,8266}$$

- Střední měrná tepelná kapacita spalín při teplotě spalín (t_k) za PK dosazením do vzorce (46):

$$\bar{c}_s(t_k) = \frac{A \cdot (t_k + 273) + B + \frac{C}{t_k + 273}}{V_s} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\bar{c}_s(t_k) = \frac{0,0013 \cdot (141,62 + 273) + 8,9188 + \frac{7,5914}{141,62 + 273}}{7,0489} = \underline{1,344 \text{ kJ} \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}}$$

- Střední měrná tepelná kapacita při vztažné teplotě ($t_0 = 20^\circ\text{C}$) dosazením do vzorce (46):

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{A \cdot (t_0 + 273) + B + \frac{C}{t_0 + 273}}{V_s} \quad [kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$$

$$\bar{c}_s(t_0) = \frac{0,0013 \cdot (20 + 273) + 8,9188 + \frac{7,5914}{20 + 273}}{7,0489} = \underline{1,3228 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

- Střední integrální hodnota v intervalu ($t_k - t_0$)

$$\bar{c}_s = \frac{\bar{c}_s(t_k) \cdot t_k - \bar{c}_s(t_0) \cdot t_0}{t_k - t_0} \left[\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1} \right] \quad (65)$$

$$\bar{c}_s = \frac{1,344 \cdot 141,62 - 1,3228 \cdot 20}{141,62 - 20} = \underline{-1,3475 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}}$$

6.6 Určení účinnosti nepřímou metodou

6.6.1 Výpočet poměrných tepelných ztrát

- Ztráta hořlavinou ve spalínách:

$$\zeta_{co} = \frac{12640 \cdot a_1 \cdot V_{sco}}{Q_1} [-] \quad (66)$$

$$\zeta_{co} = \frac{12640 \cdot 7,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,9539}{20178,7} = \underline{0,00045}$$

- Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích:

$$\zeta_c = \frac{b \cdot C^r \cdot 32600}{Q_1} [-] \quad (67)$$

$$\zeta_c = \frac{0,0211 \cdot 0,5112 \cdot 32600}{20178,7} = \underline{0,01744} \quad 0,01744$$

- Ztráta fyzickým teplem spalin:

$$\zeta_k = \frac{V_s \cdot \bar{c}_s(t_k - t_0)}{Q_1} [-] \quad (68)$$

$$\zeta_k = \frac{7,0489 \cdot 1,3475 \cdot (141,62 - 20)}{20178,7} = \underline{0,05725}$$

- Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků:

$$\zeta_f = \frac{A^r \cdot \sum \frac{X_i \cdot \overline{c_{si}} \cdot (t_i - t_0)}{1 - C_i}}{Q_1} \quad [-] \quad (69)$$

$$\zeta_f = \frac{0,1976 \cdot \left(\frac{0,45 \cdot 0,7438 \cdot (63,16 - 20)}{1 - 0,0028} + \frac{0,55 \cdot 0,7832 \cdot (141,62 - 20)}{1 - 0,0884} \right)}{20178,7} = \underline{0,0007}$$

i = (LP, ÚP)

$$\overline{c_{LP}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{LP} \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (70)$$

$$\overline{c_{LP}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 63,16 = \underline{0,7438 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$\overline{c_{ÚP}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot t_{ÚP} \quad [kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (71)$$

$$\overline{c_{ÚP}} = 0,712 + 0,502 \cdot 10^{-3} \cdot 141,62 = \underline{0,7832 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

- Tepelný výkon parního kotle:

$$\dot{Q}_{\text{tepelný výkon}} = 7 \cdot 3472,87 + 0,3 \cdot 1407,46 - 35,07 \cdot 656,36 = \underline{98,16 \text{ MW}} \quad (72)$$

- Ztráta sdílením tepla do okolí podle ČSN 07 0302:

$$\zeta_{sv} = \zeta_{svj} \cdot \frac{\dot{Q}_{\text{tepelný výkon}}}{\dot{Q}_{\text{tepelný výkon}}} \quad (73)$$

$$\zeta_{sv} = 0,00553 \cdot \frac{125,45}{98,16} = \underline{0,00707}$$

$$\zeta_{svj} = k_1 \cdot \dot{Q}_{\text{tepelný výkon}} \quad [-] \quad (74)$$

$$\zeta_{sv} = 3 \cdot 125,45^{-0,35} \cdot 10^{-2} = \underline{0,00553}$$

Konstanta pro druh paliva, na který je kotel konstruován : k = 2,5

Norma ČSN 070302 dostatečně nezohledňuje ztrátu sdílením tepla do okolí při spalování v kotli s fluidní vrstvou, kde je použit rozměrný nechlazený cyklónový odlučovač. Proto je ve všech výpočtech pro tuto ztrátu použita norma ČSN EN 12952-15.

- Tepelná ztráta sáláním a konvekcí v MW podle ČSN EN 12952-15:

$$\zeta_{\text{sk}} = \frac{1}{15} \cdot 125,45^{0,7} = 0,927 \text{ MW} \quad (75)$$

$$\zeta_{\text{sk}} = 0,927 \text{ MW}$$

$$\zeta_{\text{sk}} =$$

C = 0,0315 pro kotle na hnědé uhlí a kotle se spalováním ve fluidní vrstvě

- Ztráta sdílením tepla do okolí podle ČSN EN 12952-15:

$$\zeta_{\text{sv}} = \frac{\zeta_{\text{sk}}}{C} \quad (76)$$

$$\zeta_{\text{sv}} = \frac{0,927}{98,16} = 0,00945 \text{ MW}$$

- Účinnost:

$$\eta = 1 - \zeta_{\text{CO}} - \zeta_{\text{C}} - \zeta_{\text{k}} - \zeta_{\text{f}} - \zeta_{\text{sv}} \quad [-] \quad (77)$$

$$\eta = 1 - 0,00045 - 0,01744 - 0,05725 - 0,0007 - 0,00945 = 0,91473$$

6.7 Vliv odsiřování spalin na hmotnostní a tepelnou bilanci

6.7.1 Odsiřování spalin

- Po přidávání uhličitanu vápenatého (vápence) do ohniště probíhá napřed reakce podle rovnice:



- Přímé odsiřování spalin se docílí reakcí oxidu vápenatého se složkami spalin podle rovnice:



- Stupeň odsíření vyjadřující zmenšení obsahu SO₂ ve spalinách o část SO₂ vázanou na CaSO₄:

$$n_s = 1 - \frac{V_{ss} \cdot \omega_{SO_2}}{0,68265 \cdot S_{spal}} [-] \quad (80)$$

$$n_s = 1 - \frac{6,3986 \cdot 2,286 \cdot 10^{-4}}{0,68265 \cdot 0,0104} = \underline{0,7939}$$

- Přepočít korigované hodnoty SO₂ na skutečný stav:

$$c_{SO_2} = c_{SO_{2r}} \cdot \frac{21 - O_2}{21 - O_{2r}} [mg \cdot m^{-3}] \quad (81)$$

$$c_{SO_2} = 612,24 \cdot \frac{21 - 4,54}{21 - 6} = \underline{671,83 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}}$$

kde referenční kyslík O_{2r} = 6 %

- Výpočet objemového podílu SO₂ ve směsi plynů v suchých spalínách:

$$\omega_{SO_2} = c_{SO_2} \cdot \frac{1}{\rho_{SO_2} \cdot 10^6} [m^3 \cdot m^{-3}] \quad (82)$$

$$\omega_{SO_2} = 671,83 \cdot \frac{1}{2,94 \cdot 10^6} = \underline{2,286 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}}$$

$$\rho_{SO_2} = \frac{M_{mol}}{V_{mol}} [kg \cdot m_N^{-3}] \quad (83)$$

$$\rho_{SO_2} = \frac{64,06}{21,8} = \underline{2,94 \text{ kg} \cdot \text{m}_N^{-3}}$$

molární hmotnost SO₂ M_{mol} = 64,01 kg.kmol⁻¹

molární objem SO₂ V_{mol} = 21,8 m³.kmol⁻¹

- Stechiometrický poměr vápníku vyjadřující nadbytek vápníku pro zajištění pokud možno úplného odsíření spalín:

$$n_{Ca} = \frac{i}{S \cdot k_s \cdot i} \quad 1 \quad (84)$$

$$n_{Ca} = \frac{0,3194}{0,0104 \cdot 3,1219 \cdot 5,318} = \underline{1,8501}$$

kde k_s je hodnota součinitele při odsířování pomocí CaCO₃

k_s = 3,1219

- Výpočet hmotnostního toku paliva do spalovacího zařízení:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{Q}}{\eta} \left[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \right] \quad (85)$$

$$\dot{m}_f = \frac{98160}{78,7 \cdot 0,91473} = 5,318 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

6.8 Výpočet objemu vzduchu a spalín při odsiřování

U přímého odsiřování spalín se změní objem spalovacího vzduchu i objem a složení spalín, proto je nutno opravit rovnice. (Index K).

- Objem spalovacího vzduchu:

$$V_{vsK} = V_{vs\min} \cdot \alpha + 1,66779 \cdot S \cdot n_s \left[m_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (86)$$

$$V_{vsK} = 5,2467 \cdot 1,2033 + 1,66779 \cdot 0,0104 \cdot 0,7939 = 6,3273 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

- Objem suchých spalín:

$$V_{ssK} = V_{ss} + S \cdot (0,63694 \cdot n_s + 0,69435 \cdot n_{Ca}) \left[m_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (87)$$

$$V_{ssK} = 6,3984 + 0,0104 \cdot (0,63694 \cdot 0,7939 + 0,69435 \cdot 1,8501) = 6,417 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

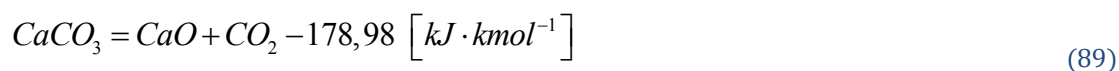
- Objem CO_2 ve spalínách:

$$V_{\text{CO}_2K} = V_{\text{CO}_2} + S \cdot (0,00055 \cdot n_s + 0,69435 \cdot n_{Ca}) \left[m_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (88)$$

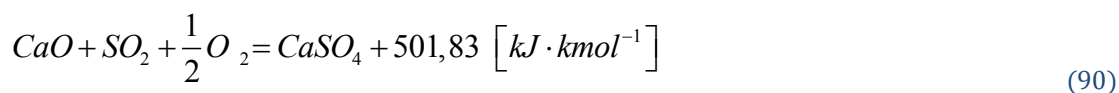
$$V_{\text{CO}_2K} = 0,9475 + 0,0104 \cdot (0,00055 \cdot 0,7939 + 0,69435 \cdot 1,8501) = 0,9609 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

6.9 Energetická bilance

- Reakce (69) je endotermní:



- Reakce (70) je endotermní:



- Těmito reakcemi se zdánlivě změní výhřevnost:

$$Q_{iK}^r = Q_i^r + \Delta Q_i^r \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (91)$$

$$Q_{iK}^r = 20178,1 + 21,8 = \underline{20200,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Kde

$$\Delta Q_i^r = S \cdot (15652 \cdot n_s - Q_{Ca} \cdot n_{Ca}) \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (92)$$

$$\Delta Q_i^r = 0,0104 \cdot (15652 \cdot 0,7939 - 5583 \cdot 1,8501) = \underline{21,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

kde pro odsíření pomocí CaCO_3 je $Q_{Ca} = \underline{5583 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$

- Hmotnostní bilance:

Množství tuhých zbytků po spalování nezvětší o reakcí vzniklý CaSO_4 a nezreagovaný přebytek CaO . Proto se musí tyto složky zahrnout do popelové bilance spolu s původní minerální složkou Ar.

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot S \cdot (n_{Ca} - n_s) \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (93)$$

$$A_{CaO} = 1,7492 \cdot 0,0104 \cdot (1,8501 - 0,7939) = \underline{0,0192 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$A_{CaSO_4} = 4,24632 \cdot S \cdot n_s \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (94)$$

$$A_{CaSO_4} = 4,24632 \cdot 0,0104 \cdot 0,7939 = \underline{0,0351 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$A_K^r = A^r + A_{CaO} + A_{CaSO_4} \quad [kg \cdot kg^{-1}] \quad (95)$$

$$A_K^r = 0,1976 + 0,0192 + 0,0351 = \underline{0,2518 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Toto zvětšení tuhých zbytků se musí respektovat zvláště při výpočtu ztráty nedokonalým spálením uhlíku ztráty fyzickým teplem tuhých zbytků.

6.10 Přepočet účinnosti při odsířování

K úplnému a přesnému sestavení hmotové a energetické bilance při přímém odsířování se musí respektovat příslušné chemické reakce. Proto rovnice v kapitolách (5.3 až 5.6) byly náležitě doplněny a upraveny hodnotami vypočtenými v kapitolách (5.7). Výpočet s takto upravenými rovnicemi byl proveden znovu a výsledky jsou uvedeny v tabulkách Tab. 8 a Tab. 9.

Tab. 8

| | | | |
|--|---|----------|---|
| nespálený uhlík | b | 0,0269 | kg.kg ⁻¹ |
| nedokonale spálený uhlík | a₁ | 0,00075 | kg.kg ⁻¹ |
| přebytek vzduchu | α | 1,1971 | |
| konstanty | R2 | 1,9841 | |
| | R4 | -0,1315 | |
| | R5 | -0,4384 | |
| | R6 | 1,0241 | |
| | R7 | 5,4810 | |
| | V2 | 0,4695 | |
| | V3 | -0,0078 | |
| spaliny vlhké | V_s | 7,0675 | m ³ _n .kg ⁻¹ |
| střední měrné kapacity spalin při – t₀ | $\overline{c}_s(t_0)$ | 1,316 | kJ.m ⁻³ .K ⁻¹ |
| při – t_k | $\overline{c}_s(t_k)$ | 1,3373 | kJ.m ⁻³ .K ⁻¹ |
| střední integrální hodnota | \overline{c}_s | 1,3408 | kJ.m ⁻³ .K ⁻¹ |
| konstanty | A₀ | 0,0003 | |
| | B₀ | 1,2245 | |
| | C₀ | -75,8241 | |
| | A | 0,0013 | |
| | B | 8,8995 | |
| | C | 6,5700 | |

Tab. 9

| poměrné tepelné ztráty: | | | |
|---|-----------------------|--------|----------|
| ztráta hořlavinou ve spalinách | ζ_{CO} | 0,045 | % |
| ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích | ζ_C | 2,219 | % |
| ztráta komínová | ζ_k | 5,705 | % |
| ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků | ζ_f | 0,090 | % |
| ztráta sdílením tepla do okolí | ζ_{sv} | 0,945 | % |
| ÚČINNOST | η | 90,997 | % |

7. Výpočet rychlosti proudění spalin

Průtok tekutin je jednou z nejčastěji měřených veličin. Základní metody měření jsou dvě:

- objemové měření průtoku vycházející ze zjišťování množství tekutiny protekla za jednotku času ustáleným objemem:

$$Q_V = \frac{V}{\tau} \quad (m^3 \cdot s^{-1}) \quad (96)$$

a pro hmotnostní průtok

$$Q_m = \frac{m}{\tau} = \frac{V}{\tau} \cdot \rho \quad (kg \cdot s^{-1}) \quad (97)$$

Objemového měření průtoku se používá hlavně tam, kde chceme získat velmi přesný údaj o hodnotě průtoku - při kalibračních a ověřovacích měřeních a v provozu u tzv. bilančních měření, která vedou k ekonomickému zhodnocení naměřené hodnoty.

- b) rychlostní měření průtoku, tedy součin střední rychlosti proudění a průřezu, kterým kapalina nebo plyn protéká

$$Q_V = \bar{w} \cdot S \quad (98)$$

resp.

$$Q_V = \rho \cdot \bar{w} \cdot S \quad (99)$$

Rychlostní průtokoměry nasazujeme nejčastěji jako provozní přístroje, které měří:

- a) střední rychlost proudění jako funkci průtoku a průtočný průřez se nemění,
- b) změnu průtočného průřezu a střední rychlost proudění zůstává konstantní.

Množství tekutiny je také velice často měřenou veličinou, která nabyla v současné době na významu zejména se zvyšujícími se cenami tepelné energie. Protekly objem V nebo hmotnost m tekutiny se určuje stejným způsobem jako při měření průtoku objemovou metodou, nebo se používá integrace naměřeného průtoku v čase, tedy:

$$V = \int_{\Delta\tau} Q_V \cdot d\tau \quad \text{resp.} \quad m = \int_{\Delta\tau} Q_m \cdot d\tau \quad (100)$$

Celá řada měřidel proteklého množství je těmito integrátory průtoku vybavena (vodoměry, plynoměry) a hodnotu proteklého množství je možno na jejich zobrazovacích prvcích zjistit okamžitě.

7.1 Výpočet rychlosti proudění

7.1.1 Rychlost ve spodní části spalovací komory (výška 7,5 m):

| | | |
|-------------------|---------|---|
| Rozměr kanálu: | hloubka | $a = 3,5 \text{ m}$ |
| | šířka | $b = 4,5 \text{ m}$ |
| Množství vzduchu: | | $V_{vz} = 55000 \text{ m}^3_{\text{N}} \cdot \text{s}^{-1}$ |
| Teplota vzduchu: | | $t_{vz} = 270 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Tlak vzduchu: | | $p_{vz} = 18000 \text{ Pa}$ |

- Množství vzduchu:

$$V_{vz} = \frac{V_{vz}}{3600} = \frac{55000}{3600} = \underline{15,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (101)$$

- Přepočet na efektivní stav:

$$V_{vz} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} = \frac{119325 \cdot V}{270 + 273,15} = \frac{101325 \cdot 15,28}{273,15} = \underline{25,82 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (102)$$

- Světlý průřez spalovací komory:

$$S = a \cdot b = 3,5 \cdot 4,5 = \underline{15,75 \text{ m}^2} \quad (103)$$

- Rychlost proudění:

$$w = \frac{V_{vz}}{S} = \frac{25,28}{15,75} = \underline{1,61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (104)$$

7.1.2 Rychlost ve střední části spalovací komory (výška 15 m):

| | | |
|-------------------------------------|---------|---|
| Rozměr kanálu: | hloubka | $a = 6 \text{ m}$ |
| | šířka | $b = 5 \text{ m}$ |
| Teplota spalin: | | $t_{vz} = 850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Tlak: | | $p_{vz} = 17000 \text{ Pa}$ |
| Množství spalin skutečných vlhkých: | | $V_{sp}^{vl} = 7,0675 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ |

Množství paliva:

$$m_{\text{pal}} = 5,318 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

- Celkové množství vzniklých spalin:

$$V_{sp} = V_{sp}^{vl} \cdot m_{\text{pal}} = 7,0675 \cdot 5,318 = \underline{37,58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (105)$$

- Množství spalin efektivní:

$$V_{sp} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} = \frac{118325 \cdot V}{850 + 273,15} = \frac{101325 \cdot 37,58}{273,15} = \underline{132,305 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (106)$$

- Světlý průřez spalovací komory:

$$S = a \cdot b = 6 \cdot 5 = \underline{30 \text{ m}^2} \quad (107)$$

- Rychlost proudění:

$$w = \frac{V_{sp}}{S} = \frac{132,305}{30} = \underline{4,41 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (108)$$

7.1.3 Rychlost ve spodní části spalovací komory (výška 27,5 m):

Rozměr kanálů:

výška

$$a = 2,5 \text{ m}$$

šířka

$$b = 3,5 \text{ m}$$

Teplota vzduchu:

$$t_{vz} = 920 \text{ }^\circ\text{C}$$

Tlak vzduchu:

$$p_{vz} = 14000 \text{ Pa}$$

Celkové množství vzniklých spalin:

$$V_{sp} = 37,58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Množství spalin efektivní:

$$V_{sp} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} = \frac{115325 \cdot V}{920 + 273,15} = \frac{101325 \cdot 37,58}{273,15} = \underline{144,226 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (109)$$

- Světlý průřez spalovací komory:

$$S = 2 \cdot a \cdot b = 2 \cdot 2,5 \cdot 3,5 = \underline{15 \text{ m}^2} \quad (110)$$

- Rychlost proudění:

$$w = \frac{V_{sp}}{S} = \frac{144,226}{15} = \underline{9,615 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (111)$$

7.1.4 Rychlost za cyklony (výška 35 m):

Rozměr kanálu:

průměr

$$a = 3 \text{ m}$$

Teplota vzduchu:

$$t_{vz} = 940 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tlak vzduchu:

$$p_{vz} = 101325 \text{ Pa}$$

Celkové množství vzniklých spalin:

$$V_{sp} = 37,58 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

- Množství spalin efektivní:

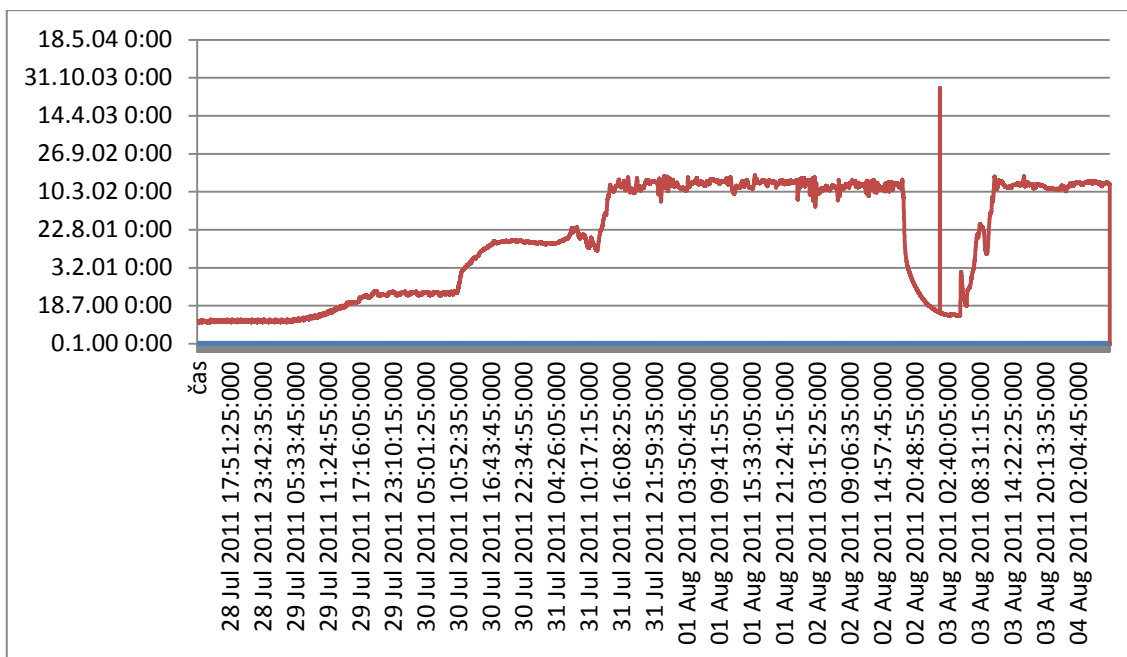
$$V_{sp} = \frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_N \cdot V_N}{T_N} = \frac{101325 \cdot V}{940 + 273,15} = \frac{101325 \cdot 37,58}{273,15} = \underline{166,905 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}} \quad (112)$$

- Světlý průřez spalovací komory:

$$S = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot 3^2}{4} = \underline{14,137 \text{ m}^2} \quad (113)$$

- Rychlost proudění:

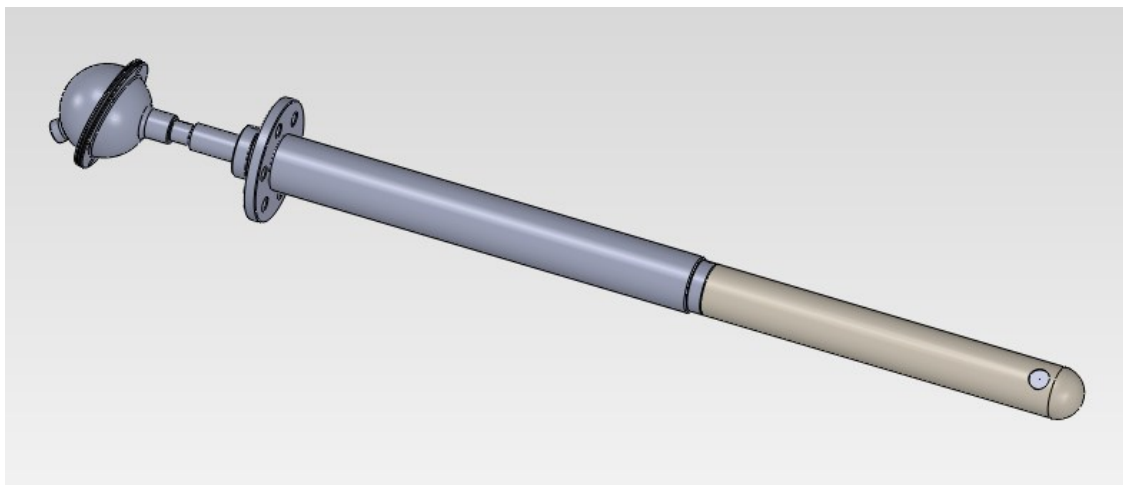
$$w = \frac{V_{sp}}{S} = \frac{166,905}{14,137} = \underline{11,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}} \quad (114)$$



Graf 1 Teploty při nájezdu fluidního kotle K11

Konstrukce nového teploměru

Popsat konstrukci a cíle nového teploměru s ohledem na tepelnou konstantu.



Obr. 14 Navrhnutý teploměr

Zdůraznit možnost většího pancéřování při zachování tepelné konstanty.

8. Nestacionární vedení tepla.

K nestacionárnímu vedení tepla dochází při ohřívání nebo ochlazování těles, při ohřívání a chlazení výrobků, při uvádění do chodu a odstavování tepelných výměníků, energetických a technologických zařízení atd. Nestacionární děj je spojen se změnou teplotního pole v tělese a se změnou tělesem akumulovaného tepla. (2)

8.1 Některé metody řešení úloh nestacionárního vedení tepla

Tepelné působení bývá zadáno nestacionárními prostorovými podmínkami třetího druhu, přičemž se mění teplota prostředí i součinitel přestupu tepla. Teplota předmětů vystavených tomuto působení dosahuje značných hodnot.

S ohledem na uvedené skutečnosti jsou nejvhodnější numerické metody, které s rozvojem počítačů postupně vytlačily i používání speciálních elektrických analogonů pro řešení úloh vedení tepla. Nejdříve se však v krátkosti seznámíme se vztahem teorie podobnosti k řešení úloh nestacionárního vedení tepla a s nejznámějším řešením analytickým. (2)

8.2 Nestacionární vedení tepla a teorie podobnosti (2)

Jak bylo uvedeno v části 1.4.3, se základy teorie podobností se seznámíme v kapitole o tepelné konvekci, pro kterou má zásadní význam. Dále jsou popsána pouze dvě kritéria podobnosti mající vztah k této kapitole.

Nestacionární vedení tepla v tělese vedením charakterizuje kritérium Fourierovo, které vyplývá z diferenciální rovnice vedení tepla v pevných tělesech bez vnitřních zdrojů:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{L^2} \quad (115)$$

Uvažujeme-li velmi často se vyskytující okrajové prostorové podmínky třetího druhu, obdržíme z Newtonovy - Fourierovy rovnice Biotovo kritérium:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad (116)$$

kteří charakterizuje závislost mezi teplotním polem v tělese a zadanými okrajovými podmínkami. Součinitel tepelné vodivosti nevztahuje na tekutinu, ale na stěnu.

Poněvadž veličiny musíme sledovat v odpovídajících si bodech prostoru, je třeba si zavést ještě bezrozměrné souřadnice:

$$\frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{z}{L} (X, Y, Z) \quad (117)$$

Řešení určité úlohy, např. jednorozměrného nestacionárního vedení tepla při okrajových prostorových podmínkách třetího druhu, je možno hledat ve tvaru:

$$\frac{\vartheta}{\vartheta_a} = f(Fo, Bi, \frac{x}{L}) \quad (118)$$

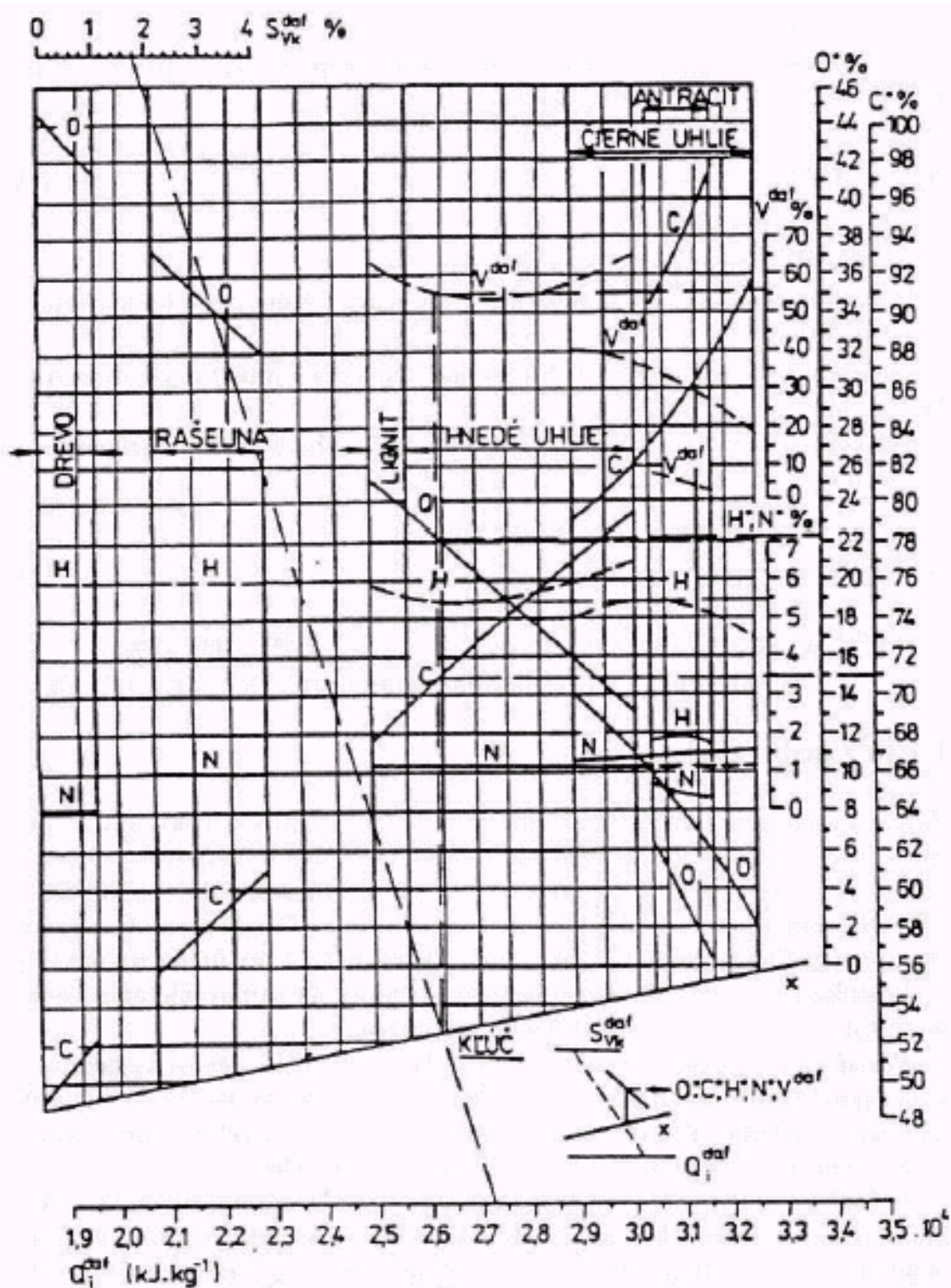
9. Závěr

Diplomová práce se zabývá možností řešení způsobu měření teploty za cyklónem fluidního kotle K11, kdy spalováním čistého černého uhlí dochází v provozu kotle k negativním jevům, kterými je zvýšení teplot za cyklónem. Nebezpečím tohoto provozu je následné možné působení ochran kotle, kdy dosažením teploty 950°C po dobu 5 minut, dojde k odstavení spalovacího traktu kotle. Při nevhodném zásahu operátora v tomto časovém úseku, a dosažení 960°C, už zapůsobí okamžitě nadřazená ochrana kotle, která sebou nese nebezpečí výpadku celého fluidního kotle. Tento stav je pro operátora kotle natolik provozně složitý, kdy je jeho úkolem tomuto stavu zabránit, je zvýšení množství přivedeného spalovacího vzduchu. Tohoto stavu je docíleno vypnutím regulace množství spalovacího vzduchu přivedeného do kotle, s následným zásahem, již v ručním režimu, navýšením množství jak vzduchu primárního, sekundárního, nebo i v krajním případě chladícího vzduchu hořáků zemního plynu. Tímto je následně dosaženo zvětšení objemu spalin, které nese s sebou v konečné fázi i výsledné snížení teplot za cyklóny. Tento způsob zásahu do spalovacího režimu kotle je doprovázen snížením účinnosti kotle, u kterého největší vliv na jeho velikost, jak je známo z výpočtu účinnosti kotle, má ztráta komínová. Pro docílení nápravy těchto nevhodných, v provozu velmi častých stavů, periodicky se opakujících dle v daný okamžik spalovaného paliva, je naplní této diplomové práce, zabývající se způsobem měření teplot ve fluidní vrstvě. Výsledným cílem práce je návrh takového termočlánku, kterým se docílí co nejkratší doby prodlevy v odezvě měřených hodnot teplot za cyklónem. Tohoto cíle lze dosáhnout úpravou měřicí jímky teploty spalin za cyklónem a montáží navrhnutého teploměru, který svou robustností odolává abrazi a zachovává příznivou časovou konstantu.

10. Seznam literatury:

- [1] ČSN 07 0302 *Přejímací zkoušky parních kotlů*, Praha 1996. 52s.
- [2] Vladimír Blahož; Zdeněk Kadlec; *Základy sdílení tepla*; Ostrava 2000 110s.
- [2] ČSN 07 0302 *Přejímací zkoušky parních kotlů, změna 1*, Praha 1999. 4s.
- [3] ČSN EN 12952-15 *Vodotrubné kotle a pomocná zařízení- Část 15: Přejímací zkoušky*, Praha 2004. 79s.
- [4] ČERNÝ, V.; JANEBA, B.; TEYSSLER, J.; *Parní kotle*, Praha 1983. 864s.
- [5] VILIMEC, L.: *Stavba kotlů I*, Ostrava 2002. 116s
- [7] Kolektiv směnových mistrů a technolog výroby E3 *Místní provozní řád fluidního kotle K11*, Třinec 1996. 53s.
- [8] RAJNIAK, I. a kol. *Tepelno-energetické a emisné merania*, Bratislava 1997. 481s.
- [9] MAREŠ, R.; ŠIFNER, O.; KADRNOŽKA, J. *Tabulky vlastností vody a páry*, Brno 1999. 156s.

11.Přilohy:



PŘÍKLAD : HNEDE UHLIE $V^{daf} = 56.20\%$ $H^* = 5.55\%$
 $Q_i^{daf} = 27\,200 \text{ kJ/kg}$ $O^* = 22.15\%$ $N^* = 1.20\%$
 $S_{vk}^{daf} = 1.8\%$ $C^* = 71.00\%$